

Ленинградский ордена Трудового Красного Знамени институт
точной механики и оптики

На правах рукописи

УДК 535.317:681.31

РОДИОНОВ Сергей Аронович

**ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

05.11.07 – оптические приборы

05.13.12 – системы автоматизации проектирования

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

ЛЕНИНГРАД – 1984

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке теории и методов автоматизированного проектирования оптических систем для решения задач повышения технического уровня оптических приборов, сокращения сроков проектирования, дальнейшего роста оптического приборостроения и перехода его на качественно новую научно-техническую основу.

Актуальность проблемы. Автоматизация проектирования на базе использования современных математических методов и средств вычислительной техники является мощным фактором научно-технического прогресса в оптическом приборостроении; важность и актуальность развития работ по комплексной автоматизации проектирования подчеркивалась в решениях XXV и XXVI съездов КПСС и нашла отражение в координационных планах Госкомитета СССР по науке и технике по решению научно-технической проблемы 0.80.15, предусматривающих создание в оптической промышленности системы автоматизированного проектирования САПР "ОПТИКА", а также в координационных планах научно-исследовательских работ Академии наук СССР по комплексной проблеме "Оптика" на 1981-1985 гг.

Несмотря на имеющийся опыт применения вычислительной техники, создание и внедрение САПР "ОПТИКА" потребовало решения принципиально новых задач, вытекающих из необходимости системного подхода к проектированию и максимального использования всех возможностей современной технической базы и прикладной математики.

Большинство этих задач решалось в процессе создания первой очереди САПР "ОПТИКА". Опыт ее разработки и эксплуатации позволил сформулировать и более сложные задачи, связанные как с расширением функциональных возможностей проектирования оптических систем, так и с переходом к автоматизированному проектированию приборов в целом.

Как показывает практика, решающее и первоочередное значение для создания и дальнейшего развития автоматизированного проектирования в оптике является разработка соответствующей теоретической базы, определяющей функциональные возможности, эффективность и перспективы развития САПР, служащей основой для последующей разработки программного обеспечения.

Цель и задачи работы. Целью данной работы является развитие и обобщение теории и методов автоматизированного проектирования оптических систем и создание теоретической базы, охватывающей все аспекты проектирования оптических систем любого класса, удовлетворяющей требованиям идеологического единства, обеспечивающей полноту круга решаемых задач, оптимальное разделение функций между конструктором и ЭВМ и служащей основой для дальнейшего перехода к автоматизированному проектированию оптического прибора в целом,

Достижение поставленной цели потребовало решения задач в следующих направлениях:

- разработки общей теории автоматизированного проектирования оптических приборов;
- разработки теории и математических моделей оптических систем как объектов автоматизированного проектирования;
- разработки и развития методов автоматизированного проектирования оптических систем.

Методы исследования. Основными методами решения поставленных задач служили системный анализ, применение аппарата современной прикладной математики, математическое моделирование с использованием ЭВМ, экспериментальная проверка правильности и эффективности полученных результатов в процессе промышленной эксплуатации разработанных на их основе методов, программ и систем автоматизированного проектирования.

Защищаемые положения. В соответствии с целями и задачами работы автор выдвигает на защиту следующие положения:

- основы общей теории автоматизированного проектирования оптических систем и приборов, включающие в себя типовые блочно-иерархические структуры прибора, его математических моделей и процесса проектирования, принципы оптимального построения САПР в оптике, их программного, лингвистического и информационного обеспечения;
- совокупность взаимосвязанных математических моделей оптической системы как объекта автоматизированного проектирования, объединенных системой обобщенных характеристик и удовлетворяющих требованиям полноты, адекватности, универсальности, экономичности и простоты;
- разработанные и развитые автором методы автоматизированного проектирования оптических систем, охватывающие все основные процедуры синтеза, анализа и оптимизации.

Научная новизна и значимость работы определяются тем, что впервые выполнено научное обобщение проблемы создания теоретической базы для автоматизированного проектирования оптических систем и приборов. В процессе решения поставленной задачи были получены следующие основные новые научные результаты.

В области общей теории автоматизированного проектирования оптических приборов:

- разработан методический единый подход к автоматизированному проектированию оптических приборов, их устройств, блоков, узлов и элементов;
- предложены новые типовые формализованные блочно-иерархические функциональные структуры оптического прибора и процесса его проектирования, ориентированные на применение математических методов и средств вычислительной техники;
- созданы иерархические структуры математических моделей оптического прибора как объекта автоматизированного проектирования;

- разработана универсальная схема процесса автоматизированного проектирования оптического прибора, содержащая минимальное число типовых проектных процедур и обеспечивающая оптимальное разделение функций между конструктором и ЭВМ;
- предложены принципы построения специального программного и лингвистического обеспечения, а также преобразования данных, обеспечивающие оптимальное функционирование САПР оптических систем и приборов.

В области теории оптических систем как объектов автоматизированного проектирования:

- впервые разработана общая теория масштабных, энергетических и структурных преобразований сигналов в оптических приборах, в том числе для неизопланатических систем, развита теория оценки качества преобразований (качества изображения) в задачах автоматизированного проектирования, разработана система обобщенных координат и характеристик и построена внешняя функциональная модель оптической системы для автоматизированного проектирования ее как функционального блока оптического прибора;
- разработан новый универсальный матричный аппарат гауссовой оптики для систем произвольного класса симметрии, ориентированный на применение методов автоматизированного проектирования; создана новая дифракционная теория формирования оптического изображения в произвольных оптических системах, основанная на концепции реальной апертурной диафрагмы, введены новые универсальные понятия для описания всех факторов, определяющих оптическое изображение, на основе системы обобщенных и канонических координат и характеристик; построена внутренняя функциональная модель оптической системы при автоматизированном проектировании, удовлетворяющая требованиям адекватности, универсальности и простоты, позволяющая создать эффективные методы синтеза, анализа и оптимизации оптических систем;
- разработана структурная модель оптической системы при автоматизированном проектировании и предложено новое универсальное уравнение для описания оптических поверхностей, содержащее минимальное число параметров;
- введено и разработано новое понятие - оптимизационной модели оптической системы, позволяющее разделить в процессе проектирования эвристические, объектно-зависимые процедуры от детерминированных и объектно-инвариантных, повысить эффективность оптимизации.

В области методов автоматизированного проектирования оптических систем:

- разработаны и усовершенствованы методы анализа характеристик оптических систем на всех уровнях автоматизированного

- проектирования, разработан новый универсальный аппарат расчета действительных лучей, совместно с их монохроматическими и хроматическими дифференциалами, поставлены и решены новые задачи экспрессного и полного анализа габаритов пучков;
- сформулирована задача и предложен универсальный аппарат аппроксимации аберраций оптических систем в процессе автоматизированного проектирования и исследования;
 - разработаны новые методы аналитического определения влияния параметров оптической системы на аберрации, позволяющие на порядок сократить трудоемкость этой процедуры;
 - предложены и разработаны экономичные методы экспресс-анализа структуры изображения;
 - приведен анализ сходимости методов оптимизации оптических систем и предложены новые оптимальные методы, обладающие наилучшей сходимостью при имеющейся информации.

Практическая ценность работы определяется тем, что на основе разработанных в диссертации теоретических положений, методов и проведенных исследований созданы алгоритмы и программы автоматизированного проектирования и контроля оптики, широко внедренные в промышленности.

Материал диссертации положен в основу разработки теоретического, математического и программного обеспечения первой в оптическом приборостроении САПР "ОПТИКА", обеспечивающей комплексную автоматизацию процесса проектирования, исследования и изготовления оптических систем.

Использование разработанных в диссертации теоретических положений и методов, а также созданной на их основе САПР "ОПТИКА" позволило повысить эффективность работы организаций и предприятий, занятых проектированием и изготовлением оптических приборов за счет применения более совершенных математических моделей оптических систем, методов их анализа, синтеза и оптимизации, методов автоматизированной обработки результатов контроля, наличия системных функций, обеспечивающих существенное повышение технико-экономических показателей оптических приборов и производительности труда конструкторов.

Полученные в работе результаты составляют также теоретическую основу для дальнейшего развития САПР оптических систем и создания комплексных САПР других функциональных устройств и оптического прибора в целом.

Реализация в промышленности. Большинство теоретических положений и результатов, полученных в диссертации и созданные на их основе алгоритмы и программы широко используются в промышленности. Разработанная в значительной части на основе материала диссертации САПР "ОПТИКА" с 1980 г. находится в промышленной эксплуатации более чем в 20 предприятиях и организациях оптического приборостроения и других отраслей промышленности, а также в нескольких вузах; приказами отраслевого

министерства предусматривается внедрение САПР "ОПТИКА" по всей отрасли; суммарный годовой эффект от ее использования составляет более 2 млн. руб.

За разработку и внедрение системы автоматизированного проектирования САПР "ОПТИКА" на предприятиях отрасли коллективу авторов, в том числе и автору настоящей работы постановлением Совета Министров СССР от 16 апреля 1983 г. присуждена премия Совета Министров СССР.

Основные положения диссертации включены в лекционные курсы "Теория оптического изображения", "Численные методы оптимизации", в учебное пособие и программу практикума по курсу "Автоматизация проектирования оптических систем" Ленинградского ордена Трудового Красного Знамени института точной механики и оптики и аналогичные курсы ряда других вузов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научных семинарах и конференциях в ЛИТМО, МВТУ им. Н.Э.Баумана, МИИГАиК, ЛОМО им. В.И.Ленина, ГОИ им. С.И.Вавилова, НПО "Экран" (Ленинград), КБ точного электронного машиностроения (Минск), на постоянном семинаре НТО приборостроительной промышленности, на семинарах в Доме оптики Государственного оптического института им. С.И.Вавилова (Москва) и др.

Кроме того, они доложены на 10 Всесоюзных конференциях и семинарах, в том числе на Всесоюзной конференции по созданию и внедрению новых оптических приборов различного назначения (Ленинград, 1971), Всесоюзной научно-технической конференции "Современная прикладная оптика и оптические приборы" (Ленинград, 1975), Всесоюзном семинаре "Методы аттестационного контроля оптических деталей и систем астроприборов" (Москва, 1977, 1978, 1979), Всесоюзной конференции "Формирование оптического изображения и методы его коррекции"(Могилев, 1979), II Всесоюзной конференции "Оптика лазеров" (Ленинград, 1980), Всесоюзном семинаре по теории и расчету оптических систем (Ленинград, 1982), I Всесоюзной конференции "Оптическое изображение и регистрирующие среды" (Ленинград, 1962), Всесоюзной школе "Синтез оптических систем" (Москва, 1983).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 85 работ (из них 59 в соавторстве).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. В конце каждой главы формулируются выводы и результаты, а также приводятся сведения о полноте их опубликования. В приложении приводятся документы, подтверждающие промышленное внедрение результатов диссертации. Общий объем диссертации составляет 473 страницы, в том числе 64 рисунка на 64 страницах, 11 таблиц на 11 страницах, список литературы объемом 414 наименований на 40 страницах, приложение на 55 страницах.

2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность проблемы, охарактеризовано состояние автоматизированного проектирования в оптике и основные направления проведенных исследований, сформированы цели и задачи работы, положения, выносимые на защиту, приведены сведения о промышленном использовании результатов работы, дан краткий обзор содержания диссертации.

Определены следующие существенные признаки САПР в оптике: идеологическое единство, полнота круга решаемых задач, оптимальное разделение функций между конструктором и ЭВМ, автоматизация внутренних функций, организация личных архивов конструкторов и банка общесистемных данных, диалоговый интерактивный режим работы с мультимедиа многими конструкторами, универсальный к машинно-независимый входной язык, удобная и наглядная форма обмена информацией между конструктором и системой, модульность структуры, обеспечивающая кодификацию и развитие.

Подчеркнуто, что для создания теоретической базы автоматизированного проектирования в оптике необходима разработка принципиально новых математических моделей и методов, ориентированных на машинную обработку и в наибольшей степени использующих возможности современной прикладной математики и вычислительной техники.

Первая глава содержит основы общей теории автоматизированного проектирования оптических систем, включающие в себя структуры и логические связи математических моделей оптической системы и методов их обработки, оптимальные алгоритмы проектирования, организацию специального программного и лингвистического обеспечения. Проблемы разработки теоретической базы автоматизированного проектирования в оптике определяются трудно совместимыми требованиями адекватности, универсальности экономичности и простоты, предъявляемыми к моделям и методам, при этом применение системного подхода требует исходить из общих задач проектирования оптических приборов, практически не отраженных в литературе.

В § 1.1 описана предложенная автором типовая блочно-иерархическая структура, в которой процесс проектирования оптического прибора разбивается на три вертикальных уровня: функциональное (схемное), конструкторское и технологическое проектирование, каждый из которых состоит из ряда горизонтальных уровней. Выделяются следующие горизонтальные уровни функционального проектирования: функциональные устройства (ФУС), функциональные блоки (ФБ), функциональные узлы (ФУЗ) и функциональные элементы (ФЭ).

На верхнем уровне любой оптический прибор представляется в виде структуры, состоящей из связанных между собой ФУС, выполняющих определенные логические функции и осуществляющих преобразование обобщенных сигналов: осветительного устройства (ОСВУ), создающего сигнал, взаимодействующий с объектом; изображающего устройства (ИЗУ),

передающего сигнал от объекта на анализатор изображения (АИ), выделяющий из полученного сигнала информацию об исследуемых свойствах объекта; устройства обработки результатов (УОБР), установочного устройства (УУ), осуществляющего в соответствии с сигналами, полученными от АИ или УОБР в обобщенном смысле "наведение" на объект; отсчетного устройства (ОУ) и устройства управления (УПРУ). На следующем уровне (ФБ) понятие преобразуемого сигнала конкретизируется: начиная, с уровня ФУЗ, где существенна физическая природа преобразуемых сигналов, функциональное проектирование разделяется на отдельные направления: оптическое, электронное, и т.д. Основная работа по проектированию оптических систем, так называемый абберационный расчет относится к уровню ФЭ, где оптическая система представляется в виде структуры, состоящей из следующих ФЭ: оптических сред, поверхностей и диафрагм.

Предложенная схема позволила построить иерархическую структуру математических моделей оптического прибора при автоматизированном проектировании, описанную в § 1.2. В основе структуры лежат три модели каждого иерархического уровня: внешняя функциональная (ВНЕФМ), внутренняя функциональная (ВНУФМ) и структурная (СМ). ВНЕФМ представляет объект как элемент в структуре высшего, $i-1^{\text{го}}$ уровня, при этом он рассматривается как "черный ящик", так ВНЕФМ оптической системы на уровне ФБ описывает ее как преобразователь обобщенного сигнала. ВНУФМ описывает процессы, происходящие при функционировании объекта внутри его структуры данного i -го уровня; ВНУФМ оптической системы, рассмотренная в гл.3, представляет ее как преобразователь электромагнитного поля. СМ описывает на i -м уровне структуру объекта, т.е. тип, вид и количество входящих и нее элементов и связи между ними, в основе СМ лежат ВНЕФМ $i+1^{\text{го}}$ уровня.

В § 1.3 рассмотрен алгоритм проектирования оптического прибора и предложена универсальная схема автоматизированного проектирования в виде интерактивного итерационного процесса, состоящего из небольшого числа типовых эвристических и детерминированных процедур. Детерминированные процедуры включают в себя СИНТЕЗ, под которым понимается первоначальное генерирование структурной модели, АНАЛИЗ, т.е. определение характеристик ВНУФМ и ВНЕФМ по параметрам СМ и ОПТИМИЗАЦИЮ – направленное изменение значений параметров с целью улучшения характеристик. Эвристические процедуры представляют собой ЗАДАНИЕ НА СИНТЕЗ, ЗАДАНИЕ НА АНАЛИЗ, ЗАДАНИЕ НА ОПТИМИЗАЦИЮ, ОЦЕНКУ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ. Рассмотрена внутренняя структура указанных процедур, их конкретное содержание при проектировании оптических систем, а также их взаимодействие. Описанная схема выгодно отличается тем, что в ней ясно видна роль каждой из проектных процедур, а также в наибольшей степени соблюдаются принципы модульности структуры и оптимальности разделения функций: все детерминированные процедуры выполняются ЭВМ, а все эвристические – конструктором.

В последних параграфах рассмотрены основные принципы организации программного, информационного и лингвистического обеспечения САПР в оптике. Оптимальная структура программного обеспечения, решающая задачи автоматизации, внутренних функций, выполнений последовательностей проектных процедур, организации архивов и диалогового взаимодействия, допускающая простую модификацию к развитию, включает в себя банк данных и библиотеку функциональных блоков, работающих под управлением специализированного диспетчера (операционной системы автоматизированного проектирования). Эффективность САПР в значительной степени зависит от рационального представления и преобразования данных. Основные формы данных, которые необходимо выделить – это внутренняя и внешняя (лингвистическая, табличная, графическая), причем обмен данными между функциональными блоками производится во внутренней форме, а между САПР и конструктором – во внешней. Важной составной частью САПР является входной язык, который должен простой синтаксис, высокий уровень защиты от ошибок, компактную форму описания данных, быть пригодным для любых работ. В диссертации предложена структура универсального входного языка заказов и данных применительно к задачам автоматизированного проектирования оптических систем.

Вторая глава посвящена построению ВНЕФМ оптической системы для целей автоматизированного проектирования на базе развития теории преобразования сигналов в оптических приборах. В §§2.1 и 2.2 рассматривается понятие обобщенного сигнала $I(x)$, приводится классификация сигналов по физическому содержанию, размерности, типу и виду обобщенной интенсивности I и обобщенных координат x , вводятся общие понятия о ВНЕФМ преобразователей сигналов в оптических приборах и дается классификация внешних функциональных характеристик. Показано, что в типичном случае линейных изопланатических преобразователей необходимо рассматривать группы характеристик, описывающих передачу отдельных свойств – масштаба, энергии и структуры сигнала. В квазиизопланатических преобразователях, к которым относятся и оптические системы, кроме того, область существования сигнала (поверхность предмета или изображения) разбивается на ряд изопланатических зон, в соответствии с этим вводятся в рассмотрение глобальные и зональные системы обобщенных координат и характеристик.

В § 2.3 рассмотрены масштабные передаточные характеристики, описывающие преобразование обобщенных координат сигнала. В пределах изопланатической зоны масштабное преобразование есть линейный оператор $x' = Vx$, где V - матрица обобщенных зональных увеличений, которая может быть представлена в виде последовательности элементарных изопланатических преобразований

$$V = R'^T \cdot D \cdot R \cdot v \quad (1)$$

где R и R' - ортогональные матрицы поворота на углы φ и φ' , D - диагональная матрица анаморфирования с элементами a и a^{-1} , v - обобщенное

увеличение. Элементы матрицы \mathbf{V} : $v_{11}, v_{12}, v_{21}, v_{22}$ или v, a, φ, φ' есть зональные передаточные характеристики в общем случае.

Преобразование глобальных координат любыми системами может быть выражено следующей формулой

$$\mathbf{x}'_0 = \mathbf{V}_0 [I + \Delta_0 + \mathbf{V}_0^{-1} \cdot \mathbf{x}_0 (\mathbf{t}_0 + \delta \mathbf{t}_0)^T + \Delta(\mathbf{x}_0)] \mathbf{x}_0, \quad (2)$$

где \mathbf{V}_0 - матрица обобщенных глобальных увеличений, \mathbf{t}_0 - вектор перспективного трансформирования, Δ_0 и $\delta \mathbf{t}_0$ - поправки из-за дисторсии, $\Delta(\mathbf{x}_0)$ - функция остаточной дисторсии. В диссертации получены выражения, связывающие зональные и глобальные масштабные передаточные характеристики для различных классов систем, позволяющие легко анализировать передачу любым преобразователем размеров и формы малых предметов, расположенных в различных местах поля.

Для исключения масштабных преобразований из анализа передачи энергии и структуры вводятся приведенные координаты $\boldsymbol{\eta}$ и $\boldsymbol{\eta}'$, в которых увеличение единично:

$$\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\Lambda} \cdot \mathbf{x}; \quad \boldsymbol{\eta}' = \boldsymbol{\Lambda}' \cdot \mathbf{x}'; \quad \boldsymbol{\Lambda}'^{-1} \cdot \boldsymbol{\Lambda} = \mathbf{V}. \quad (3)$$

В § 2.4 описаны энергетические передаточные характеристики. Сначала определяются понятия обобщенной энергии входного и выходного сигналов в обобщенных координатах

$$E = \iint I(\mathbf{x}) d\mathbf{x}; \quad E' = \iint I'(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' \quad (4)$$

и в приведенных координатах

$$E_R = \iint I(\boldsymbol{\eta}) d\boldsymbol{\eta}; \quad E'_R = \iint I'(\boldsymbol{\eta}') d\boldsymbol{\eta}', \quad (5)$$

затем вводятся коэффициенты передачи энергий H и H' , названные обобщенными зональными светосилами (передней и задней):

$$H = \frac{E}{E'}; \quad H' = \frac{E'_R}{E_R} = H |\det^{-1} \mathbf{V}|. \quad (6)$$

Определенные таким образом светосилы являются обобщением и уточнением соответствующих понятий теории оптических систем, не зависят от вида сигнала, т.е. являются собственными характеристиками преобразователя и применимы к любым преобразователям; при этом интенсивность изображения "протяженного" сигнала определяется задней светосилой, $I'(\mathbf{x}') = I(\mathbf{x})H'$, а "точечного" сигнала - передней: $I'(\mathbf{x}') = E \cdot H \cdot h_1(\mathbf{x}')$, где $h_1(\mathbf{x}')$ - нормированная к единичной энергии функция рассеяния точки (ФРТ). В качестве глобальных энергетических передаточных характеристик вводятся центральные обобщенные светосилы H_0, H'_0 и функции светораспределения по полю $\Phi(\mathbf{x}_0), \Phi'(\mathbf{x}'_0)$. Из самых общих предпосылок получены простые выражения для связи передней и задней функций светораспределения в системах различных классов, необходимые при проектировании широкоугольных систем.

Возможности анализа сигналов при автоматизированном проектировании оптических приборов в значительной степени определяются ограниченностью современной теории, основанной на концепции изопланатизма. В § 2.5 развивается общая теория, результатами которой являются выражения, описывающие передачу спектра частот входного сигнала любыми неизопланатическими преобразователями и позволяющие производить в процессе автоматизированного проектирования анализ реальных оптических систем без каких-либо упрощений:

$$\tilde{I}'(\omega) = \int \tilde{I}(\omega - \omega') D(\omega', \omega) d\omega'; \quad (7)$$

$$\tilde{I}'(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2\pi \cdot i)^n n!} \frac{\partial^n \tilde{I}(\omega)}{\partial \omega^n} \frac{\partial^n D(0, \omega)}{\partial \eta^n}, \quad (8)$$

где $D(\omega, \omega')$ - так называемая неизопланатическая ОПФ (НОПФ), определяемая через Фурье-преобразование неизопланатической функции рассеяния (ФР) по двум переменным: $D(\omega, \omega') = F[h(\eta, \Delta\eta')]$, ω' - "частота неизопланатизма". Формула (7) показывает, что при неизопланатизме происходит "смещение" частот, а формула (8) есть обобщение широко известного соотношения фильтрования; она наглядно показывает, что спектр частот $\tilde{I}'(\omega)$ выходного сигнала (изображения) представляет собой сумму, каждый член которой получен фильтрованием n -й производной по частоте от спектра $\tilde{I}(\omega)$ входного сигнала (предмета), причем фильтром является n -я производная от ОПФ по координате предмета. В диссертации исследованы также пределы применимости обычной изопланатической теории и показано, что они определяются величиной относительного неизопланатизма, диапазоном частот и размерами предмета.

Проблемы оценки качества изображения при автоматизированном проектировании рассматриваются в § 2.6, в котором сформулированы требования к адекватному критерию качества и анализируются две модели преобразования сигналов в оптических приборах. В модели с идеальным АИ и аддитивным шумом критерий качества изображения, определяющий дисперсию оценки измеряемого параметра объекта или вероятность ошибки при наблюдении, приводится к следующему виду, позволяющему легко анализировать влияние отдельных характеристик

$$d^2 = \left(\frac{\bar{I}'}{\sigma_n} a \cdot 2 \cdot \omega_M\right) \left(\frac{\bar{I}'}{\sigma_n} a \cdot R\right), \quad (9)$$

где $R = \int \bar{G}^{-1}(\omega) |\bar{\Phi}(\omega) D(\omega)|^2 d\omega$, \bar{I}' - средняя интенсивность сигнала на входе АИ, σ_n^2 - дисперсия шума, $\bar{G}(\omega)$ - его нормированный спектр, $\frac{\bar{I}'}{\sigma_n}$ - отношение сигнал/шум, $D(\omega)$ - ОПФ ИЗУ, $\bar{\Phi}(\omega)$ - нормированная "функция задачи", показывающая, для какой цели строится изображение. Отдельные

множители в формуле (9) имеют простой физический смысл: $\bar{I}' / \sigma_n \cdot a \cdot 2 \cdot \omega_M$ - максимально возможная информационная емкость участка изображения, $\bar{I}' / \sigma_n \cdot a \cdot R$ - его информационная емкость в данной задаче и с данным АИ и ИЗУ. Для измерительных приборов более адекватной является впервые предложенная в диссертации модель с АИ, вырабатывающем сигнал рассогласования, пропорциональный изменению измеряемого параметра. С помощью этой модели получено следующее выражение для критерия качества, обратно пропорционального дисперсии оценки измеряемого параметра:

$$d^2 = \sigma_b^{-2} = \left[\left(\frac{E'}{\sigma_f} \right) \left| \iint \tilde{I}_0(\omega) D(\omega) g(\omega) d\omega \right| \right]^2, \quad (10)$$

где $g(\omega)$ – функция, описывающая схему и принцип действия АИ. На основе выражений (9) и (10) предложены также относительные критерии, позволяющие в процессе автоматизированного проектирования объективно оценивать эффект изменения конструкции какого-либо функционального блока и осуществлять его оптимизацию.

В § 2.7 вводятся важные понятия о присоединительных внешних характеристиках, содержащих информацию, необходимую при проектировании для согласования данного преобразователя с предыдущим и последующим. Выделяются три группы характеристик: предметные, зрачковые и спектральные, а также входные (передние), выходные (задние), глобальные, зональные характеристики. Рассмотрены определения, физический смысл, состав и наиболее рациональное описание присоединительных характеристик, оптических систем разных классов симметрии.

В заключение рассматривается конкретное содержание обобщенных координат и характеристик для двух типов предмета к изображения: дальнего и ближнего, при этом предметом и изображением дальнего типа считаются такие, размеры которых воспринимаются как угловые, а ближнего - как линейные, независимо от конкретного расстояния до них. Такие определения, как показано в диссертации, позволяют получить соотношения между характеристиками не зависящие от типа оптической системы и в наибольшей степени удовлетворяющие требованиям адекватности, универсальности и простоты.

Построению ВНУФМ оптической системы на базе теории формирования оптического изображения посвящена **третья глава**. ВНУФМ является одной из основных при автоматизированном проектировании, на ней основаны методы синтеза, анализа и оптимизации и от ее качества в значительной степени зависит эффективность этих методов. В технической оптике к настоящему времени не существует моделей, ориентированных на автоматизированное проектирование и удовлетворяющих всем требованиям; применяемые модели, в частности, "геометрическая" при анализе аберраций и "волновая" при анализе структуры изображения слабо связаны между собой, не обладают

универсальностью и полнотой, ограничены классом центрированных систем, допускают неоднозначность основных понятий и имеют другие существенные недостатки. В диссертации описана единая ВНУФМ оптической системы, основанная на концепции реальной или эквивалентной апертурной диафрагмы и в наибольшей степени удовлетворяющая требованиям адекватности, универсальности, экономичности и простоты. В § 3.1 рассматриваются основные исходные понятия и выводится выражение для обобщенного принципа Гюйгенса-Френеля, описывающего дифракционное распространение поля через неоднородную среду, в частности, оптическую систему:

$$u(\mathbf{p}) = \frac{i}{\lambda} \iint u(\mathbf{a}) \tau^{1/2}(\mathbf{a}, \mathbf{p}) \exp[-ikE(\mathbf{a}, \mathbf{p})] \left(n^2 |\det^{-1} \mathbf{G}_{12}| \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha'} \right)^{1/2} d\mathbf{a}, \quad (11)$$

где $u(\mathbf{a})$ и $u(\mathbf{p})$ - комплексные амплитуды поля на поверхностях S_A и S_P , $\tau(\mathbf{a}, \mathbf{p})$ и $E(\mathbf{a}, \mathbf{p})$ - коэффициент пропускания и оптическая длина луча, соединяющего точки A и P , \mathbf{G}_{12} - подматрица гауссовой матрицы окрестности этого луча, α и α' - углы луча с поверхностями S_A и S_P .

В следующих двух параграфах развивается матричная теория гауссовой оптики для произвольных оптических систем. Сначала вводятся определения четырехмерного дифференциала $d\mathbf{r}$ произвольного действительного луча как обобщения понятия нулевого луча, в виде совокупности приращений угловых и линейных координат, определяющих луч. В пределах небольшой окрестности действительного луча (гауссовой области) справедливо линейное соотношение между дифференциалами в пространствах предметов к изображений $d\mathbf{r}$ и $d\mathbf{r}'$:

$$d\mathbf{r}' = \mathbf{G} \cdot d\mathbf{r}, \quad (12)$$

где \mathbf{G} - "гауссова матрица" четвертого порядка оптической системы для данного луча. Исследования преобразований гауссовой матрицы при изменении систем координат, а также ее оптических свойств приводят к следующим равенствам:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_{11}^T \mathbf{G}_{21} - \mathbf{G}_{21}^T \mathbf{G}_{11} &= 0; & \mathbf{G}_{11}^T \mathbf{G}_{22} - \mathbf{G}_{21}^T \mathbf{G}_{12} &= \frac{n}{n'} \mathbf{I}; \\ \mathbf{G}_{12}^T \mathbf{G}_{21} - \mathbf{G}_{22}^T \mathbf{G}_{11} &= -\frac{n}{n'} \mathbf{I}; & \mathbf{G}_{12}^T \mathbf{G}_{22} - \mathbf{G}_{22}^T \mathbf{G}_{12} &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

где \mathbf{G}_{ij} - подматрицы матрицы \mathbf{G} , представленной в блочном виде. На базе этих результатов и введенной в гл.2 системы обобщенных характеристик и координат построена в гауссовой области ВНУФМ любых оптических систем, в общем случае не обладающих никакой симметрией, получены матричные формулы для обобщенного увеличения, уравнения сопряжения зрачков, предмета и изображения, продольной расфокусировки, а также доказаны универсальные фундаментальные соотношения, справедливые в самом общем случае:

$$\mathbf{V}_P = \mathbf{V}^{-T}; \quad \mathbf{D}' = (-1)^{0+i} \mathbf{V} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{V}^T, \quad (14)$$

где \mathbf{V}_p - матрица обобщенных увеличений в зрачках, \mathbf{D} и \mathbf{D}' – границы обобщенных продольных расфокусировок, 0 и i – признаки типов предмета и изображения.

В §§ 3.4 – 3.6, посвященных проблемам построения ВНУФМ оптических систем в реальной области, предлагается новая схема формирования оптического изображения, в которой дифракция происходит на реальной апертурной диафрагме, без переноса ее в пространство предметов или изображений, как в существующих моделях; относительно этой же диафрагмы происходит вращение пучков лучей при смещении точек предмета. Показано, что как теория изопланатизма, так и рассмотрение дифракции в оптических системах однозначно приводят к описанию всех факторов, определяющих структуру изображения, посредством абберрационной функции в обобщенных зрачковых координатах, выраженных через оптическую длину и координаты действительного луча, выходящего из точки A предмета, терпящего излом в точке P_d пересечения с апертурной диафрагмой и попадающего в точку A'_i идеального изображения. При этом векторы \mathbf{p} и \mathbf{p}' обобщенных входных и выходных зрачковых координат и абберрационная функция w определяются соотношениями: $w = [A \cdot P_d \cdot A'_i]$,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{p} &= n \cdot \bar{\mathbf{q}}; \quad \mathbf{p}' = n' \cdot \bar{\mathbf{q}}' \quad \text{для ближнего предмета и изображения,} \\ \mathbf{p} &= n \cdot \mathbf{s}; \quad \mathbf{p}' = n' \cdot \mathbf{s}' \quad \text{для дальнего предмета и изображения;} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где $\bar{\mathbf{q}}$ и $\bar{\mathbf{q}}'$ – проекции ортов указанного луча на координатные плоскости, касательные поверхностям предмета и изображения, \mathbf{s} и \mathbf{s}' - радиус-векторы точек пересечения луча с входной и выходной сферами. Полученные определения отличаются простотой, симметрией по отношению к обращению хода лучей, являются универсальными, одинаково пригодными для любых типов и классов оптических систем и обладают высокой адекватностью, т.е. отражают реальные процессы, происходящие в системах: именно эти функции и координаты входят в формулы, описывающие формирование изображения, а функция w регистрируется на интерферограммах при исследовании оптических систем. Из анализа свойств функции w получены универсальные соотношения, показывающие изменение аббераций при смещении предмета, смещении точки по зрачку, расфокусировке. В частности, сформулирована и доказана общая теорема изопланатизма $\partial w / \partial \mathbf{x} = \mathbf{V}_{p'}^T - \mathbf{p}$, получены универсальные и точные формулы для поперечных аббераций, обобщенный закон синусов и обобщенное условие Гершеля. Обобщенные координаты и абберрационная функция (15) включают в себя в качестве частных случаев все применяющиеся в оптике функции (волновые абберации, эйконалы), однако в реальных системах функция (15) не может быть заменена ни на одну из известных без потери точности.

В § 3.7 на базе определений (15) вводится универсальное описание факторов воздействия оптической системы на проходящее поле. Ограничение размеров поля описывается в обобщенных координатах областями зрачков Ω и Ω' посредством матриц \mathbf{A} и \mathbf{A}' обобщенных апертур, функций отклонения

формы зрачка от канонической и центрального экранирования. Все факторы, определяющие структуру изображения данной зоны, объединяются в зрачковую функцию, выраженную через координаты и абберационную функцию (15):

$$f(\mathbf{p}) = \tau^{1/2}(\mathbf{p}) \exp[-ik \cdot w(\mathbf{p})] \text{ внутри } \Omega; f(\mathbf{p}) = 0 \text{ вне } \Omega, \quad (16)$$

где $\tau(\mathbf{p})$ – неотрицательная функция пропускания вдоль луча. Благодаря указанным определениям, а также обобщенным координатам оказалось возможным получить простые, универсальные и в то же время точные формулы для выражения внешних передаточных характеристик через зрачковую функцию. Введенные понятия позволили также построить дифракционную теорию формирования оптического изображения, свободную от многих недостатков существующих моделей. В такой теории, рассмотренной в § 3.8, распространение поля через оптическую систему разбивается на три стадии:

первая дифракция (на предмете)

$$u(\mathbf{p}) = \iint u(\mathbf{x}) \exp\left[ik(\mathbf{x}^T \mathbf{p} + \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{T} \cdot \mathbf{x})\right] d\mathbf{x}; \quad (17)$$

фильтрация через систему

$$u'(\mathbf{p}') = u(\mathbf{p}) f(\mathbf{p}) \lambda^{-2} (|\det \mathbf{V}| Z Z'^{-1})^{1/2}; \quad \mathbf{p}' = \mathbf{V}^{-T} \mathbf{p}; \quad (18)$$

вторая дифракция (на апертурной диафрагме)

$$u'(\mathbf{x}') = \iint u'(\mathbf{p}') \exp\left[-ik(\mathbf{x}'^T \mathbf{p}' + \frac{1}{2} \mathbf{x}'^T \mathbf{T}' \mathbf{x}')\right] d\mathbf{p}', \quad (19)$$

где $u(\mathbf{x})$, $u(\mathbf{p})$, $u'(\mathbf{p}')$, $u'(\mathbf{x}')$ – поля на предмете, входном и выходном зрачках и изображении в обобщенных координатах, \mathbf{T} , \mathbf{T}' – матрицы положений зрачков, Z , Z' – косинусы углов луча с осью. Полученные выражения справедливы для любых оптических систем без каких-либо ограничений и не сложнее, чем известные, гораздо более приближенные формулы.

В § 3.9 вводятся так называемые канонические координаты, впервые предложенные Гопкинсом (H.Hopkins). Уточнение этих понятий и расширение их на произвольный класс систем дает следующие формулы:

$$w_0 = w/\lambda; \quad \mathbf{p} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{p}; \quad \mathbf{p}' = \mathbf{A}'^{-1} \mathbf{p}'; \quad \boldsymbol{\eta} = -\mathbf{A} \mathbf{x} \lambda^{-1}; \quad \boldsymbol{\eta}' = -\mathbf{A}' \mathbf{x}' \lambda^{-1};$$

$$\omega = -\mathbf{A}^{-1} \mathbf{v} \lambda; \quad \omega' = -\mathbf{A}'^{-1} \mathbf{v}' \lambda; \quad \mathbf{k} = -(\lambda n)^{-1} \mathbf{A} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{A}^T (-1)^0; \quad \chi = \frac{\kappa - \kappa_0}{\Delta \kappa} \quad (20)$$

где w_0 – каноническая абберационная функция, \mathbf{p} , \mathbf{p}' – канонические координаты на зрачках, $\boldsymbol{\eta}$, $\boldsymbol{\eta}'$ – на предмете и изображении, ω , ω' – канонические пространственные частоты, \mathbf{k} и \mathbf{D} – канонические и реальные продольные расфокусировки, χ , κ – каноническая и обобщенная спектральная координата, λ – длина волны. В канонических координатах любая оптическая система имеет единичное увеличение, единичные размеры зрачков стандартной формы, единичный спектральный интервал; все соотношения между

характеристиками приобретают крайне простой вид, открываются возможности достижения большей модульности структуры САПР.

Важной проблемой является аналитическое описание aberrаций при автоматизированном проектировании. В § 3.10 показано, что удовлетворяющее всем требованиям описание основывается на глобальном полихроматическом разложении aberrационной функции по ортогональному базису от канонических координат χ, σ, ρ , где σ - вектор относительных (канонических) полевых координат:

$$w_0(\chi, \sigma, \rho) = \sum_k C_k \psi_k(\chi, \sigma, \rho). \quad (21)$$

Коэффициенты C_k разложения являются полной моделью aberrаций, конкретный вид и состав базиса ψ_k зависит от свойств симметрии системы.

Четвертая глава посвящена разработке структурной модели оптических систем при автоматизированном проектировании, включающей в себя описание оптических сред, оптических поверхностей, диафрагм, их последовательности и взаимного расположения.

В § 4.1 рассмотрены вопросы рационального списания оптических сред и приведены предложенные для целей автоматизированного проектирования автором (совместно с В.Г.Резником) выражения, аппроксимирующие показатель преломления во всем спектральном интервале пропускания материала и в рабочем интервале длин волн конкретной системы.

Задача описания формы оптических поверхностей решается в § 4.2, где предлагается простое универсальное уравнение, удовлетворяющее всем требованиям, пригодное для описания любых поверхностей, а также технологических деформаций:

$$f(\mathbf{s}, \mathbf{a}) = \mathbf{s}^T \mathbf{k} - \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{R} \cdot \mathbf{s} - Q(\mathbf{s}). \quad (22)$$

Здесь \mathbf{s} – радиус-вектор точки на поверхности, \mathbf{a} – вектор параметров, \mathbf{k} – орт оси z , \mathbf{R} – матрица квадратичной формы, $Q(\mathbf{s})$ – член деформации высшего порядка и технологических деформаций. Приводятся выражения для связи уравнения (22) с внешними параметрами формы различных поверхностей, а также с данными, необходимыми для расчета лучей.

В пятой главе рассмотрены основные проблемы анализа оптических систем - важнейшей процедуры при автоматизированном проектировании. Для удовлетворения противоречивым требованиям адекватности, экономичности и простоты процедура анализа разбивается на ряд уровней и подуровней возрастающей адекватности и в то же время сложности: анализ ВНУФМ (в области Гаусса, в области aberrаций третьего порядка, экспресс и полный анализ габаритов пучков и aberrаций), анализ ВНЕФМ (экспресс и полный), моделирование преобразования сигналов. Первый параграф посвящен расчету хода действительных лучей и их дифференциалов, поставляющего основную информацию при анализе ВНУФМ. Применение понятий дифференциалов лучей и методов их расчета через систему открывает пути эффективного решения различных задач, связанных с определением габаритов пучков,

аппроксимацией aberrаций, анализом влияния параметров и т.п. Для повышения экономичности и точности анализа хроматизма вводится новое понятие - хроматических дифференциалов луча, применение которых может во многих случаях заменить расчет лучей неосновных длин волн. Для расчета дифференциалов в работе получены компактные формулы как для общего случая произвольного луча, так и для меридионального луча. При анализе aberrаций расчет через систему одного основного луча и необходимого количества дифференциалов позволяет получить значения aberrационной функции, ее первых, вторых и третьих производных по зрачковым и предметным дифференциалам - всего более 10 данных.

Важным этапом анализа ВНУФМ оптических систем является определение габаритов пучков, рассмотренное в § 5.2, где задача поставлена как нахождение области Ω существования пучка в зрачковых координатах \mathbf{p} . Для описания факторов, определяющих область Ω , вводятся граничные функции $b_i(\mathbf{p})$, характеризующие непопадание луча на поверхность, полное внутреннее отражение, прохождение за границей пересечения, за световыми габаритами, причем $b_i(\mathbf{p}) > 0$ внутри Ω . На низшем уровне задача формулируется как нахождение координат центра зрачка, соответствующего главному лучу, проходящему через центр области Ω_d апертурной диафрагмы. Для решения этой задачи в диссертации предлагается итерационный процесс, включающий в себя расчет главного луча и двух его зрачковых дифференциалов, с уточнением зрачковых координат на k -й итерации по формуле $\mathbf{p}^{(k+1)} = \mathbf{p}^{(k)} + \Delta\mathbf{p}^{(k)}$, где $\Delta\mathbf{p}^{(k)} = -\mathbf{Q}^{-1}(\mathbf{a}^{(k)} - \mathbf{a}_0)$ в случае прохождения луча и $\Delta\mathbf{p}^{(k)} = \nabla b[\bar{b} - b_i(\mathbf{p}^{(k)})] \|\nabla b\|^{-2}$ в случае непрохождения; $\mathbf{a}^{(k)}$ и \mathbf{a}_0 - векторы текущих координат луча на диафрагме и координат центра области Ω_d , $b_i(\mathbf{p}^{(k)})$ и \bar{b} - текущее и заданное значение граничной функции непрохождения, ∇b - ее градиент, \mathbf{Q} - матрица Якоби зависимости $\mathbf{a}(\mathbf{p})$. Описанная методика обеспечивает решение сразу нескольких задач: нахождение главного луча из любого, начального приближения, определения матрицы \mathbf{A} входных апертур и вторых производных aberrационной функции.

На высших уровнях анализа габаритов пучков необходимо учитывать все граничные функции, а также взаимозависимость габаритов различных пучков. Для решения этой задачи в диссертации предложен алгоритм, в основе которого лежит быстро сходящийся итерационный процесс поиска граничного луча, определяемого множеством различных граничных условий. Благодаря учету всех факторов предложенный алгоритм обеспечивает получение габаритов пучков, с высокой степенью точности адекватных реальным.

Необходимым этапом анализа ВНУФМ оптических систем при автоматизированном проектировании является аппроксимация aberrаций, т.е. нахождение коэффициентов аналитического выражения (21), полностью описывающего aberrационную функцию, по результатам расчета определенного количества лучей. Аналогичная задача возникает при обработке

экспериментальных данных исследования оптических систем. В § 5.3 аппроксимация аберраций рассматривается с наиболее общих позиций, на основе теории решения некорректных задач, развитой в трудах акад. А.Н.Тихонова, и статистических методов регрессионного анализа, с использованием системы обобщенных характеристик и координат, введенных в диссертации. Исходя из этого задача аппроксимации формулируется как решение операторного уравнения относительно вектора \mathbf{c} неизвестных коэффициентов:

$$\mathbf{Ac} = \mathbf{b}; \quad b_i = D[w_0(\chi_i, \boldsymbol{\sigma}_i, \boldsymbol{\rho}_i)], \quad (23)$$

где D - разностный или дифференциальный оператор, конкретный вид которого определяется схемой расчета лучей или эксперимента, $\chi_i, \boldsymbol{\sigma}_i, \boldsymbol{\rho}_i$ - узлы аппроксимации, \mathbf{A} - структурная матрица, составленная из значений оператора D , примененного к различным функциям базиса (21) на узлах. Решение задачи (23) можно записать в виде $\mathbf{c} = \mathbf{A}_\varepsilon^T \mathbf{b}$, где \mathbf{A}_ε^T обозначает обобщенное обращение с заданной степенью устойчивости. В диссертации предложен универсальный метод нахождения решения как при расчете, так и при экспериментальном исследовании, основанный на ортогонализации структурной матрицы и последующем регрессионном анализе.

Одной из важнейших проблем является определение производных от характеристик оптической системы по ее конструктивным параметрам, необходимых при оптимизации, назначении допусков, юстировке, комплектации и т.п. В настоящее время для решения этой задачи применяются почти исключительно конечно-разностные методы, отличающиеся крайне высокой трудоемкостью. Описанные в литературе аналитические методы дифференцирования либо чрезвычайно громоздки, либо имеют значительную погрешность, В § 5.4 на основе введенных ранее понятий предлагаются простые и в то же время точные формулы для аналитического дифференцирования аберрационной функции w_0 по конструктивным параметрам τ_j :

$$\frac{\partial w_0}{\partial \tau_j} = -\frac{\partial f}{\partial \tau_j} \Gamma \cdot n_{k+1} \cdot \lambda_0^{-1} + \frac{\partial p'}{\partial \tau_j} \Delta \eta'; \quad dp' = (d^2[t_k]) \lambda_0^{-1}, \quad (24)$$

где f - функция из уравнения (22), $d^2[t_k]$ - дифференциалы оптической длины луча, получаемые из расчета двух зрачковых и двух предметных дифференциалов луча.

Одной из наиболее трудоемких процедур автоматизированного проектирования является рассмотренный в § 5.5 анализ ВНЕФМ, связанный с определением структурных передаточных характеристик, в частности ОПФ. Для сокращения трудоемкости этого вида анализа предложен метод эллиптической аппроксимации области интегрирования в выражении ОПФ центрированных систем через зрачковую функцию, с последующим преобразованием координат. В результате ОПФ представляется в виде двух множителей

$$D(\omega, \theta) = D_0(\omega) \int_0^1 \int_0^{2\pi} \exp[2\pi i \cdot sV(\omega, \theta, \rho_{\mathcal{E}}, \varphi_{\mathcal{E}})] d\rho_{\mathcal{E}}^2 d\varphi_{\mathcal{E}}, \quad (25)$$

где $D_0(\omega)$ - безаберрационная ОПФ. Разностная абберационная функция $sV(\omega, \theta, \rho_{\mathcal{E}}, \varphi_{\mathcal{E}})$, входящая в формулу (25), представлена в виде разложения по степеням координат $t_{\mathcal{E}} = \rho_{\mathcal{E}}^2$; $\beta_{\mathcal{E}} = \rho_{\mathcal{E}} \cdot \cos \varphi_{\mathcal{E}}$, причем коэффициенты разложения связаны с коэффициентами c_k аббераций простыми соотношениями. Для уменьшения количества узлов интегрирования и повышения точности разработаны квадратурные формулы, учитывающие непостоянство весовой функции. Практические исследования и длительная эксплуатация предложенного метода в процессе экспресс-анализа структуры изображения показали существенные преимущества его по экономичности при вполне приемлемой погрешности.

Шестая глава посвящена вопросам построения эффективной процедуры оптимизации оптических систем - одной из важнейших при автоматизированном проектировании. В § 6.1 вводится понятие оптимизационной модели оптической системы, позволяющее разделить процесс оптимизации на две принципиально различных процедуры. Первая - построение или выбор оптимизационной модели, будучи эвристической и объектно-ориентированной, наиболее эффективно выполняется конструктором-оптиком, вторая - собственно оптимизация построенной модели, будучи детерминированной, трудоемкой и объектно-инвариантной, выполняется ЭВМ. Таким образом, введение оптимизационной модели обеспечивает рациональное разделение функций между конструктором и ЭВМ и способствует модульности структуры САПР. Основными компонентами оптимизационной модели являются параметры оптимизации \mathbf{x} , оптимизируемые функции $\mathbf{f}(\mathbf{x})$, критерий оптимизации φ , ограничения и связывающие их соотношения - проба и проба производных. Выбор оптимизационной модели является одним из центральных моментов и должен удовлетворять сформулированным в гл.1 требованиям адекватности, экономичности и простоты, при этом адекватность заключается в корреляции с объективными внешними критериями качества изображения, введенными в гл.2, а простота - в достижении наибольшей линейности функций $\mathbf{f}(\mathbf{x})$, обеспечивающей наилучшую сходимость оптимизации. Выбор $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ и φ , в наибольшей степени отвечающий указанным требованиям, основан на ВНУФМ оптических систем и методах аппроксимации аббераций и имеет следующий вид:

$$\mathbf{f} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{A}_{\varepsilon}^T \cdot \mathbf{b}; \quad \varphi = \mathbf{f}^T \mathbf{f}, \quad (26)$$

где \mathbf{b} - вектор значений аббераций небольшого набора лучей, \mathbf{A} - структурная матрица глобальной аппроксимации, \mathbf{Q} - "матрица критерия", зависящая от выбранного критерия качества изображения и постоянная для всех систем данного класса.

Приведенный в § 6.2 обзор методов оптимизации применяемых в оптике доказывает, что все они являются разновидностями локального спуска, где на

каждом k -м шаге производится перемещение в пространстве параметров в соответствии с формулой

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \rho^{(k)} \Delta \mathbf{x}^{(k)}, \quad (27)$$

причем методы отличаются между собой выбором направления спуска $\Delta \mathbf{x}^{(k)}$. Наибольшую эффективность обеспечивают методы второго порядка, в частности, так называемый демпфированный или сдержанный метод наименьших квадратов (ДМНК), в котором $\Delta \mathbf{x}$ определяется выражением

$$\Delta \mathbf{x} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \mathbf{D} \lambda)^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{f}_0, \quad (28)$$

где $\mathbf{f}_0 = \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(k)})$, $\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}$, \mathbf{D} – демпфирующая матрица. Однако, выбор метода оптимизации способа демпфирования и величины демпфера производится часто из эмпирических соображений, не обеспечивающих наилучшую сходимость.

В § 6.3, посвященном разработке оптимального метода, вводится понятие области линейности каждого шага $\Omega_L^{(k)}$ и показано, что причиной потери сходимости ньютоновских методов является выход вектора $\Delta \mathbf{x}$, определенного формулой (28) далеко за пределы области линейности $\Omega_L^{(k)}$ из-за наличия слабо влияющих или линейно связанных параметров, типичных для оптических систем. Оптимальный метод строится на базе ДМНК при соответствующем выборе демпфирующей матрицы Ω^{-2} , описывающей размеры и форму области линейности:

$$\Delta \mathbf{x} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \Omega^{-2} \lambda)^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{f}_0, \quad (29)$$

где демпфер λ выбирается из условия $\Delta \mathbf{x}^T \Omega^{-2} \Delta \mathbf{x} \leq 1$. Для определения демпфера предлагается простой алгоритм, основанный на том, что оптимальная величина демпфера обеспечивает выполнение условия $1 - \alpha < \rho_{opt} < 1 + \beta$ где ρ_{opt} – оптимальная длина шага в формуле (27), α, β – малые константы. Весьма близким по сходимости к оптимальному ДМНК является также предложенный в диссертации метод, основанный на поиске оптимального базиса матриц \mathbf{A} или $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$, обладающего степенью обусловленности не хуже заданной ε^{-1} . Существенным преимуществом метода является возможность исключения небазисных параметров из оптимизационной модели и, следовательно, понижения размерности пространства параметров. Приведенные в диссертации практические результаты подтверждают высокую эффективность предложенных методов. В заключение показана тесная связь разработанных методов оптимизации и аппроксимации с современным математическим аппаратом решения некорректных задач и обобщенного обращения матриц, позволяющая наиболее эффективно использовать прикладную математику для автоматизированного проектирования оптических систем.

В седьмой главе описаны основные результаты практической реализации разработанных в диссертации теоретических принципов и методов при

создании первой в оптическом приборостроении системы автоматизированного проектирования САПР "ОПТИКА". Основные части САПР "ОПТИКА" - подсистема автоматизированного проектирования оптики АСПО "ОПАЛ" и подсистема обработки результатов контроля оптики целиком основаны на теоретической базе, развитой в диссертации и разрабатывались под научным руководством и при непосредственном участии автора.

Проектирование оптических систем в АСПО "ОПАЛ" реализовано в виде итерационного процесса интерактивного взаимодействия конструктора с ЭВМ в соответствии со схемой, описанной в гл.1, обеспечивающей выполнение основных проектных процедур СИНТЕЗА, АНАЛИЗА и ОПТИМИЗАЦИИ при оптимальном разделении функций между конструктором и ЭВМ. Для АСПО "ОПАЛ" разработан ряд принципиально новых методов автоматизированного синтеза, таких как синтез двухлинзового склеенного объектива с выбором наилучшей пары стекол и глобальной полихроматической оптимальной балансировкой aberrаций, синтез оптических систем из модулей с известными свойствами. Процедура АНАЛИЗА в АСПО "ОПАЛ" реализована наиболее полно и обеспечивает высокую степень универсальности и адекватности при низкой трудоемкости. Этому способствовало применение аппарата матричной оптики, дифференциалов действительных лучей, экспрессных и полных методов анализа габаритов пучков, аппроксимации aberrаций, анализа структуры изображения, а также системы обобщенных и канонических координат и характеристик. При экспресс-анализе структуры изображения применен метод эллиптической аппроксимации, позволивший в несколько раз повысить оперативность и экономичность этого вида анализа. Для полного анализа структуры изображения использован метод быстрого преобразования Фурье (БПФ), специально модифицированный с целью повышения экономичности. Для ОПТИМИЗАЦИИ оптических систем применены быстро сходящиеся и экономичные методы поиска оптимального базиса и ДМНК, кроме того, максимально повышена экономичность процедуры "проба" за счет использования хроматических дифференциалов и аппроксимации aberrаций по небольшому количеству лучей. Примененные технические решения позволили обеспечить при ограниченных ресурсах ЭВМ выполнение заказов на оптимизацию значительного числа конструкторов, в том числе в интерактивном режиме.

Важной составной частью САПР "ОПТИКА" является подсистема автоматизированной обработки данных исследования оптических систем и деталей, получаемых от интерферометрических и гартмановских методов. Основные проблемы создания этой подсистемы, связанные с косвенной зависимостью первичной информации от исследуемых характеристик и ее значительными случайными погрешностями измерения, были решены на основе применения методов аппроксимации aberrаций, системы обобщенных характеристик, соотношений ВНУФМ оптических систем. Подсистема обеспечивает обработку первичной информации, аппроксимацию aberrаций или технологических деформаций поверхностей ортогональными полиномами,

проведение регрессионного анализа и последующего анализа структуры изображения.

В § 7.2 описаны структура и особенности программного и лингвистического обеспечения САПР "ОПТИКА", осуществляющего автоматизацию внутренних функций, организацию и поддержку интерактивного режима и мультидоступа, личных архивов конструкторов, предоставление пользователям универсального входного языка, выполнение всех детерминированных процедур по заказам пользователя, отображение результатов, ввод информации. Входной язык заказов и данных имеет достаточно простой синтаксис, высокий уровень защиты от ошибок, развитую систему присвоения значений по умолчанию, обеспечивает простое и компактное задание исходных данных для любых процедур, организацию последовательности процедур, указание режимов выполнения, взаимодействие с архивами, простоту овладения пользователем.

Технико-экономические показатели и основные результаты промышленного использования САПР "ОПТИКА" рассмотрены в § 7.3. Общее количество решаемых проектных задач - свыше 70, объем специального программного обеспечения порядка 700 тыс. команд, из них около 600 тыс. непосредственно относящихся к математическим методам и алгоритмам, рассмотренным в диссертации. Общее количество функциональных блоков, реализующих различные проектные процедуры и операции - свыше 50, они состоят более чем из 600 программных модулей. С 1980 г. САПР "ОПТИКА" введена в промышленную эксплуатацию на ЛОМО им. В.И.Ленина, к середине 1983 г. - более чем в 20 предприятиях и организациях различных отраслей промышленности и нескольких вузах, в их числе: НПО "Экран", ВНИИМ им. Д.И.Менделеева, КБТЭМ (г.Минск), НИИ Радиооптики (г.Москва), КБ Приборостроения (г.Тула), Госцентр "Природа" (г.Винница), предприятия п/я В-8450, п/я А-5532, п/я А-7453, п/я А-3771, п/я В-2954, п/я В-8279, п/я Г-4046, п/я В-8657, п/я В-8828, МВТУ им. Н.Э.Баумана, МИИГАиК, НИИГАиК и др. Приказами отраслевого министерства предусмотрено широкое внедрение САПР "ОПТИКА" в оптическом приборостроении и дальнейшее ее развитие. Промышленная эксплуатация подтвердила правильность теоретических принципов и методов, заложенных при разработке САПР "ОПТИКА" и показала ее высокую эффективность. В целом по опыту эксплуатации были получены следующие данные технико-экономической эффективности: в среднем в 3 раза сокращаются сроки и трудоемкость разработки оптических систем, на 5% уменьшается число оптических деталей, на 8-10% сокращаются сроки проектирования приборов, на 25-30% уменьшается время изготовления крупногабаритной оптики, в 10 раз - время юстировки астрономических приборов. Применение САПР "ОПТИКА" подняло на качественно новый уровень проектирование оптических систем, обеспечило значительное повышение технико-экономических показателей оптических приборов. Суммарный годовой эффект от применения САПР "ОПТИКА", подтвержденный актами о внедрении, составляет более 2 млн. руб.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация охватывает все основные аспекты автоматизированного проектирования оптических систем: общую теорию и организацию программного, лингвистического и информационного обеспечения, построение различных математических моделей оптических систем при автоматизированном проектировании, эффективные методы и алгоритмы анализа и оптимизации оптических систем на всех уровнях проектирования. Развитый в диссертации методически единый подход к автоматизированному проектированию оптических систем и приборов позволил разработать универсальные структуры оптического прибора и алгоритмы проектирования, содержащие минимальное число типовых проектных процедур и обеспечивающие оптимальное разделение функций между ЭВМ и проектировщиком. Предложенные принципы организации программного, лингвистического и информационного обеспечения автоматизированного проектирования в оптическом приборостроении явились основой для создания соответствующих частей САПР "ОПТИКА". Разработанная на базе теории сигналов внешняя функциональная модель оптической системы, совместно с системой обобщенных координат и характеристик обеспечила возможность анализа и оптимизации функциональной схемы оптического прибора при автоматизированном проектировании. Развитие матричной теории гауссовой оптики, предложенная теория формирования оптического изображения, основанная на концепции реальной апертурной диафрагмы привели к построению единого описания основных характеристик и свойств оптической системы, получению универсальных соотношений между характеристиками и созданию внутренней функциональной модели оптической системы - одной из основных при автоматизированном проектировании. Рассмотрение структурной модели оптической системы позволило предложить новые способы описания характеристик оптических сред и поверхностей, отличающиеся простотой, универсальностью и экономичностью. Введение понятий дифференциалов лучей, разработка методов их расчета и на их основе методов определения габаритов пучков, влияния параметров, разработка теории и методов аппроксимации аберраций и анализа структуры изображения привели к созданию теоретического и математического обеспечения всех уровней анализа оптических систем, как при автоматизированном проектировании, так и при исследовании. Введение нового понятия - оптимизационной модели, применение современного аппарата линейной алгебры и решения некорректных задач позволили существенно повысить эффективность методов и алгоритмов оптимизации - одной из важнейших процедур при автоматизированном проектировании оптических систем и приборов.

Все полученные в работе результаты нашли практическое применение и составили теоретическую базу для создания программ и систем автоматизированного проектирования и исследования оптики, в том числе первой в отечественном приборостроении САПР "ОПТИКА", находящейся в

промышленной эксплуатации более чем в 20 организациях и нескольких вузах. Эти результаты составляют также основу для дальнейшего развития САПР "ОПТИКА" и для построения теоретической базы комплексных систем автоматизированного проектирования оптического прибора в целом. Промышленная эксплуатация подтвердила правильность теоретических принципов и методов, рассмотренных в диссертации, и показала их высокую эффективность, обеспечивающую повышение производительности труда проектировщиков, технико-экономического уровня проектов, сокращение трудоемкости изготовления оптики. Суммарный годовой экономический эффект от внедрения разработанных методов составил свыше 2 млн. руб.

Полученные в диссертации результаты представляют собой теоретическое обобщение и решение крупной научной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение - создание теоретической и методической базы для построения в оптическом приборостроении систем автоматизированного проектирования, исследования и изготовления оптических систем и приборов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

Учебное пособие для вузов

1. Родионов С.А., Автоматизация проектирования оптических систем.- Л.: Машиностроение, 1982 - 270 с.

Статьи, опубликованные в журналах АН СССР

2. Родионов С.А., Передача пространственных частот неизопланатическими приборами.- Опт. и спектр., 1972, т.32, вып.1, с.178-183.
3. Родионов С.А., Об изопланатизме в произвольных оптических системах. - Опт. и спектр., 1979, т.46, вып.3, с.566-573.
4. Родионов С.А., О дифракции в оптических системах. – Опт. и спектр., 1979, т.46, вып.4, с.776-784.
5. Родионов С.А., Матричный аппарат гауссовой оптики в окрестности произвольного луча.- Опт. и спектр., 1981, т.50, вып.3, с.969- 976.
6. Родионов С.А., Фильтрация пространственных частот оптическими системами в случае неизопланатизма. - Опт. и спектр., 1981, т.50, вып.6, с.1178-1184.
7. Родионов С.А., Об описании aberrаций оптических систем. - Опт. и спектр., 1982, т.52, вып.5, с.891-897.
8. Зверев В.А., Родионов С.А., Сокольский М.Н., Проблемы создания адаптивного зеркала.- Изв. АН СССР, Серия физическая, 1980, т.44, № 10, с.2066-2074.
9. Рамм А.Г., Родионов С.А., Оптимизация разрешающей способности оптических приборов. - Опт. и спектр., 1977, т.42, вып.3, с.540-545.

Статьи, опубликованные в научно-технических журналах, трудах институтов

10. Родионов С.А., Использование производных весовой функции в методе Гопкинса для вычисления дифракционных интегралов. - Изв. вузов СССР - "Приборостроение", 1972, т.15, № 11, с.99-103.
11. Родионов С.А., Полихроматическая оптическая передаточная функция оптических систем в канонических координатах,- Изв. вузов СССР - "Приборостроение", 1973, т.16, № 6, с.120-124.
12. Родионов С.А., Передаточные характеристики оптических систем в теории изображения,- В кн.: Расчет и конструирование оптических систем: Труды ЛИТМО, вып.75, Л: ЛИТМО, 1974, с.36-42.

13. Родионов С.А., Присоединительные характеристики оптических приборов,- В кн.: Расчет и конструирование оптических систем: Труды ЛИТМО, вып.75, Л.: ЛИТМО, 1974, с.43-45.
14. Родионов С.А, Типы оптических систем и конкретизация обобщенных характеристик. - В кн.: Расчет и конструирование оптических систем: Труды ЛИТМО, вып.75, Л.: ЛИТМО, 1974, с.46-53.
15. Родионов С.А., Масштабные передаточные характеристики оптических систем. - Изв. вузов СССР - "Приборостроение", 1977, т.20, №10, с.117-121.
16. Родионов С.А., Об описании оптических поверхностей в программах расчета оптических систем на ЭВМ. – Изв. вузов СССР - "Приборостроение", 1978, т.21, № 5, с.105-109.
17. Родионов С.А., Обобщенная светосила оптических приборов. - Изв. вузов СССР - "Приборостроение", 1979, т.22, № 1, с.81-84.
18. Родионов С.А., О расчете дифференциалов лучей через оптические системы.- Изв. вузов СССР - "Приборостроение", 1980, т.23, № 3, с.72-76.
19. Родионов С.А., Об автоматизации проектирования оптических систем. - Изв. вузов СССР - "Приборостроение", 1983, т.26, № 2, с. 67-76.
20. Родионов С.А., Вознесенский Н.Б, Аппроксимация аберраций оптических систем с использованием значений волновых, поперечных и продольных аберраций. – Изв. вузов СССР - "Приборостроение", 1979, т.22, № 6, с.87-90.
21. Родионов С.А., Гутман Е.И., Оптимизация нелинейных систем.- В кн.: Расчет и конструирование механизмов и деталей приборов. - Л.: Машиностроение, 1975, с.5-37.
22. Родионов С.А., Пржевальский Л.И., Шехонин А.А., Алгоритм определения габаритов пучков в программах расчета лучей через оптическую систему.- В кн.: Расчет и конструирование оптических систем: Труды ЛИТМО, вып.75, Л.: ЛИТМО, 1974, с.53-59.
23. Родионов С.А., Пржевальский Л.И., Шехонин А.А, Применение коэффициентов интерполяционного полинома для представления аберраций оптических систем. - Изв. вузов СССР - "Приборостроение", 1974, т.17, № 10, с.104-107.
24. 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.15, № 8, с.97-101.
25. Родионов С.А., Усоскин В.В., Агурок И.П., Автоматизация обработки результатов контроля оптических систем и деталей.- В кн. Оптическое приборостроение: Труды ЛИТМО, Л.: ЛИТМО, 1980, с.18-22.
26. Родионов С.А., Усоскин Э.В., Пржевальский Л.И., Вычисление ортогональных на кольце полиномов Цернике. - В кн.: Проектирование и исследование оптических систем: Труды ЛИТМО, Л.: ЛИТМО, 1979, с.67-71.
27. Автоматизация проектирования оптических систем / С.А.Родионов, В.В.Усоскин, Л.И.Пржевальский и др.- В кн.: Оптическое приборостроение: Труды ЛИТМО, Л.: ЛИТМО, 1980, с.9-18.
28. Математические основы гартмановского теста главного зеркала БТА / В.А.Зверев, С.А.Родионов, М.Н.Сокольский и др.- Опт.-мех. пром., 1977, № 2, с.18-22.
29. Шехонин А.А., Родионов С.А., Синтез оптической системы с заданными свойствами из изопланатических поверхностей на ЭВМ. - В кн.: Расчет, конструирование и исследование точности оптических систем: Труды ЛИТМО, 1976, вып.64, Л.: ЛИТМО, с.79-82.
30. Шехонин А.А., Родионов С.А., Алгоритм синтеза склеенного объектива на ЭВМ.- Изв. вузов СССР - "Приборостроение", 1981, т.23, №11, с.73-76.

Разработанные оптические системы и приборы защищены 10 авторскими свидетельствами, в их числе

31. А.с. 652519 (СССР) Телескоп / В.А.Зверев, Р.М.Кашерининов, С.А.Родионов, М.Н.Сокольский, В.В.Усоскин,- Опубл. в Б.И., 1979, № 10.

32. А.с. 948236 (СССР) Объектив с вынесенным входным зрачком / М.М.Русинов, С.А.Родионов, И.Д.Николов.

Часть результатов отражена в материалах Всесоюзных конференций и тезисах докладов (15 наименований), отчетах о НИР (3 наименования).