

На правах рукописи



УДК 681.2:539.3:537.7:518.5 + 007 (023):510.67

НЕМТИНОВ Владимир Борисович

**СТРУКТУРНАЯ ТЕОРИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
ОПТИКО- и ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

Специальности:

**05.11.07 – оптические и оптико-электронные приборы и комплексы;
05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ**

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук**

Москва – 2004г.

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э.Баумана на кафедре <<Лазерные и оптико-электронные системы>>

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Ган М.А.
доктор технических наук, профессор
Норенков И.П.
доктор технических наук, профессор
Власов Н.Г.

Ведущая организация – ФГУП <<ВНИИОФИ>>, г. Москва

Защита состоится " 26 " января 2005 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.11 в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э.Баумана по адресу:

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, зал Учёного совета.

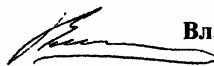
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу:

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, МГТУ им. Н.Э.Баумана, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.11.

Автореферат разослан "1 " декабря 2004 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Власов И.Б.

404

НЕ НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Формулировка проблемы и её актуальность. Математическая теория систем, том числе современных систем оптико-электронного приборостроения, переживает период бурного развития, поскольку она занимается актуальными проблемами поиска математических методов решения междисциплинарных задач. По этому вопросу известны труды Н.П.Бусленко, Н.Н.Моисеева, Б.Я.Брусилковского, А.М.Мороза, М.Г.Гаазе-Рапопорта, Д.А.Поспелова, Дж.Касти, Дж.Клира, Л.Льюнга, Б.С.Флейшмана, У.Портера и др. В них приблизительно выделяются два направления развития. В одном упор делается на повседнис (функционировани) системы, а математическая теория систем рассматривается как расширение и обобщение теории управления. Второе направление развития, в котором особое внимание уделяется структурным характеристикам, называют структуралистским, или кибернетическим.

Научная проблема, решению которой посвящена диссертация, формулируется следующим образом: разработка в рамках системно-модельного подхода структурной теории и методики математического моделирования оптико- и лазерно-электронных систем, позволяющих с единых методологических позиций упорядочить, формализовать и автоматизировать этапы проектирования, изготовления и экспериментального исследования оптико-электронных приборов. *Актуальность* этой проблемы обусловлена следующими факторами.

В оптическом приборостроении вместо теории систем часто применяется термин системотехника, под которой понимают научно-техническую дисциплину, охватывающую вопросы проектирования, создания, исследования, испытания и эксплуатации сложных в техническом отношении оптико-электронных приборов (систем). Классический системный подход (в широком смысле), или его синоним – системный анализ, также употребляемый в широком смысле (особенно в англоязычной литературе), позволяет выделять основные этапы разработки оптико-электронного прибора как предметно-физической реализации оптико- и лазерно-электронной системы. При этом оптико-физическая сущность процесса преобразования сигналов в системе как отображения множества сигналов в себя отодвигается на второй план, а методика разработки оптико-электронного прибора основывается на изучении комплексных "общесистемных" проблем. Сошлёмся на работы Л.П.Лазарева, Г.Н.Грязина, Ю.М.Астапова, Д.В.Васильева, Ю.И.Заложнева и др.

В упомянутых работах под оптико-электронной системой понимается целостная совокупность взаимоупорядоченных, взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, обладающих пространственной структурной или поведенческой замкнутостью. Эта совокупность элементов выполняет определённую задачу для достижения поставленной цели. Причём эффект, достигаемый от такой совокупности, не является суммарным по отношению к каждому из её функционально завершённых элементов. Однако данное определение системы, и прежде всего оптико- и лазерно-электронной системы, на современном уровне нуждается в уточнении.

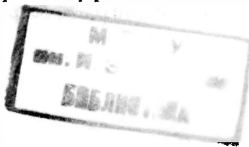
Хотя введённое определение разъясняет интуитивное восприятие оптико-электронного прибора в виде системы как совокупности сложного связанного набора технических объектов, но в настоящее время не может считаться удовлетворительным. Во-первых, оптический преобразующий элемент суть новая подсистема. Во-вторых, что понимать под упорядоченностью, связями, взаимодействием и функциональной завершённостью элементов, и в-третьих, что такое суммарный эффект.

ИТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1698521

амтинов В.Б. Структурная



Поэтому в современной математической теории систем обходят попытки дать явное определение системы, так как не известно, что такое несистема. В соответствии с этим считается, что изучаемая система задана, если имеется какая-либо её модель, не обязательно математическая. Этот постулат служит оправданием положением развиваемого в диссертации системно-модельного подхода к описанию процесса преобразования сигналов в оптико- и лазерно-электронной системе, который является расширением классического системного подхода. Работами, лежащими в основе разработки системно-модельного подхода, являются труды Н.П.Бусленко, Н.Н.Моисеева и А.А.Самарского.

В такой трактовке оптико-электронную систему с необходимостью анализируют и синтезируют в рамках тех или иных заместителей (образов, слепков и т.п.) – моделей. Это, в свою очередь, требует идентификации различных моделей и их связности, построения таксонной иерархии моделей, уточнения фундаментального модельного представления – математической модели (ММ) оптико- и лазерно-электронной системы и создания классификационных категорий сигналов и систем.

Методы построения ММ системы относятся к общей методологии теории систем и с большой полнотой развиты А.Арбибом, Л.Заде, Р.Калманом, Ю.П.Пытьевым, И.М.Ягломом и др. Вначале теория систем развивалась для изучения явлений, связанных с передачей электрических сигналов, и была разработана для анализа свойств (прежде всего устойчивости) динамических систем, поведение которых идентифицируют дифференциальные уравнения, содержащие производные по времени. В оптике процесс распространения излучения описывается волновым уравнением, содержащим вторую частную производную по времени, так что любой оптический преобразующий элемент является динамической системой с распределёнными параметрами, сигналы в которой распространяются со скоростью света. Динамика «оптического поведения» — это динамика распределённых систем, задаваемых уравнениями в частных производных. Она настолько сложна и относительно мало изучена, что практически её успехи относятся к исследованию разгорания генерации в лазерах, анализу поведения электрооптических и акустооптических модуляторов, приёмников излучения. Это позволяет при построении ММ оптико-электронной системы рассматривать классические оптические преобразующие элементы (объективы, зеркала, призмы, слои пространства, голограммы, пространственно-частотные фильтры и т.п.) как стационарные подсистемы с сосредоточенными параметрами и накладывает соответствующие ограничения на характер ММ как элементов, так и всей оптико- и лазерно-электронной системы.

Классическое описание структуры и поведения оптико-электронной системы строится на языке схемных моделей (прежде всего структурно-функциональных схем) и расчётных формул в рамках теории линейных инвариантных систем. Как показано в работах В.В.Солодовникова, А.А.Фельдбаума и др., простота, удобство и наглядность схемных моделей позволили им стать хорошей методической базой в системах управления и дали возможность решать задачи анализа и синтеза систем с сосредоточенными параметрами и с заранее заданными свойствами. В книге А.Г.Бутковского "Структурная теория распределённых систем" построенная теория позволила ввести общий формальный подход к системам с сосредоточенными и распределёнными параметрами на основе понятия блока (звена) с распределёнными параметрами, который в диссертационной работе распространён на оптико-электронные системы.

В оптико-электронном приборостроении структурно-функциональные схемы являются схемным фундаментом координатно-свёрточного и мультипликативного пространственно-частотного подходов к описанию процесса преобразования сигналов в классических оптико- и лазерно-электронных системах. Такое описание дано в работах М.М.Мирошникова, Г.М.Мосягина, Л.Ф.Порфирьева, Ю.Г.Якушенкова, автора и др., где введены понятия когерентной и некогерентной функций рассеяния, когерентной и оптической передаточных функций и решаются задачи обнаружения, измерения и воспроизведения полезного сигнала.

Создание новых оптико- и лазерно-электронных систем требует дальнейшего развития теории структурно-функциональных схем для замены схемного прообраза системы математическим модельным фундаментом. Это осуществляется в рамках системно-модельного подхода в результате перехода к разрабатываемой структурной теории с целью построения методики математического моделирования оптико-электронных приборов. Такой переход происходит на основе построения организованной системы моделей и формирования банка классических и новых ММ оптических преобразующих элементов с распределёнными параметрами на основе понятия стационарной подсистемы с сосредоточенными параметрами и идентификации структурной связности этих элементов на языке теории графов.

Структурная теория оптико- и лазерно-электронных систем формирует язык и средство классической поведенческой теории. По образному выражению основоположника кибернетики Н.Винера, "...язык науки и его способность выражать сложные ситуации в сжатой форме... есть то, что часто является главным объектом развития;...преимущества, достигаемые хорошим языком и хорошей символикой, суть: стандартный метод постановки задачи; метод выражения фактов задачи, который исключает случайный выбор координат; а также указание как решать задачу". В рамках этих постулатов структурная теория включает в себя научные положения, позволяющие на основе структурной и поведенческой связности сигналов и преобразующих элементов реализовать эти преимущества.

В приборостроении ведущая роль принадлежит проектным работам. Системный подход к проектированию оптико-электронных приборов рассмотрен в трудах Я.Дитриха, В.В.Кулагина, С.А.Родионова, автора и др. Принципы системного подхода, в том числе структура системы, типизация связей, определение атрибутов и анализ влияния среды, детально исследованы в работах И.П.Норенкова.

В классическом представлении проектирование сводится к разработке научно-технической документации, предназначенной для создания прообраза ещё несуществующего объекта. На современном уровне оптико-электронного приборостроения такое определение нельзя считать удовлетворительным уже потому, что в нём термин "проектирование" раскрывается с помощью расплывчатого понятия "разработка документации". В действительности, при проектировании возникает необходимость последовательно-параллельного перебора моделей оптико-электронного прибора на основе организованной системы моделей, прежде всего ММ. В рамках структурной теории этот перебор индуцирует создание методологии модельного синтеза, в основе которой лежит тотальное единство всех существующих моделей оптико- и лазерно-электронной системы. Так как структурную связность моделей наиболее целесообразно идентифицировать на графовом языке, то модельный синтез системы сводится к заданию последовательно-параллельных графовых модельных переходов, описывающих, в частности, этапы разработки документации. При этом задача про-

ектирования оптико-электронного прибора является главной задачей разрабатываемого в диссертации модельного синтеза оптико-электронной системы.

Заметим, что от модельного синтеза в широком смысле следует отличать модельный синтез, рассматриваемый уже в узком смысле как совокупность методологических средств, используемых для параметрической оптимизации ММ оптико- и лазерно-электронной системы путём перебора её параметров при заданной числовой целевой функции. Модельный синтез (в узком смысле), или его синоним – системный анализ (в узком смысле), возник в эпоху ЭВМ. Его совершенствование определяется возможностями и перспективами развития вычислительной техники. Одной из основных задач системного анализа на базе ЭВМ является, в частности, проблема автоматизированного проектирования технических объектов (систем). В рамках разрабатываемой в диссертации методики модельного синтеза в широком смысле при необходимости применяется методика модельного синтеза в узком смысле для оптимизации параметров создаваемой ММ оптико-электронного прибора.

Расширение конечной совокупности структурно-функциональных схем, используемой при описании классических оптико-электронных систем и в дальнейшем называемой парадигмой, с необходимостью приводит к построению структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем, которая опирается на графовую организацию системы моделей и графовые пути (графовые целевые функции) их применения. Иначе говоря, в основе теории лежит структурная реализация системно-модельного подхода к описанию процесса преобразования сигналов в оптико-электронных приборах в виде модельно-графового метода, незатронутого другими исследователями. В структурной теории много новых идей и, прежде всего, точное и строгое определение ММ оптико- и лазерно-электронной системы, которая вводится на основе тернарной математической структуры MSt Бурбаки-Колмогорова

$$MSt = \langle\langle S_1, S_2, \dots, S_K; R_1, R_2, \dots, R_l; P_1, P_2, \dots, P_n \rangle\rangle, \quad (1)$$

где $S_1, S_2, \dots, S_K$ – основные множества; $R_1, R_2, \dots, R_l$ – m -арные отношения; $P_1, P_2, \dots, P_n$ – конечный запас отображений. С помощью триадной MSt , содержащей

$$\langle\langle \text{основные множества } S_K; \text{отношения } R_l; \text{отображения (операторы) } P_n \rangle\rangle, \quad (2)$$

в диссертации строятся новые ММ оптико- и лазерно-электронных систем. Иначе говоря, структурная теория – это такая дедуктивная теория, которая позволяет "увидеть" систему сквозь "призму" структурной и поведенческой связности сигналов и преобразующих элементов в рамках современной трактовки ММ на основе систематики модельных представлений оптико-электронных приборов. Математическая структура даёт возможность перейти от расплывчатого понимания ММ как приближенного описания оптико- и лазерно-электронной системы, выраженного с помощью математической символики, к строгой формулировке ММ в виде реализаций триад (1) и (2), содержание которых полно отражает свойства моделируемой системы. Известно, что создание новых ММ означает существенный шаг в развитии науки, а нередко и принципиальный поворот.

Перечисленные вопросы говорят о неисчерпаемости рассматриваемой проблемы и подчеркивают актуальность создания структурной теории на языке графовых и других структурно-математических модельных представлений. Актуальность проблемы обусловлена прежде всего тем, что структурный подход при разработке ММ оптико- и лазерно-электронной системы до настоящего времени не применялся. Диссертация

устраняет этот пробел в рамках создаваемых системно-модельного подхода к описанию процесса преобразования сигналов в оптико-электронных приборах и методики модельного синтеза системы. Структурная теория изучает и другие проблемы, близкие к упомянутым, которые раньше неясно было даже как сформулировать. К ним относятся классификационные категории ветвления системы, факторизация (разбиение) сигнальных подпространств на типы сигналов, поведенческий тип системы как структурный критерий качества, графовая сборка моделей и принципиальные схемы (оптические и голографические). Это требует для своего исследования специального математического аппарата, важную часть которого составляют теория графов и теория групп. Особую роль играют ранее не существовавшие ММ оптико- и лазерно-электронной системы в виде графовых моделей, которые опираются на парадигмальный структурно-функциональный схемный каркас, идентифицируют структурную связность ММ поведения оптических преобразующих элементов и должны использовать новые методы анализа. В рамках практического применения научных основ структурной теории построенные ММ лежат в основе модельного синтеза четырёх новых перспективных дифракционных лазерно-электронных систем.

Цель исследований. Создание структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем в результате детального анализа сложившихся подходов к проектированию оптико-электронных приборов и обобщения практического опыта их изготовления, наладки и эксплуатации. Разработка научных положений теории, которые могут быть положены в основу формирования теоретической базы моделирования оптико- и лазерно-электронных систем, и применение этих положений на различных этапах проектирования, создания и экспериментального исследования оптико-электронных приборов. Построение с помощью структурной теории инженерно-графовой методики модельного синтеза оптико- и лазерно-электронных систем для разработки новых перспективных оптико-электронных приборов.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются **следующие задачи:**

1. Разработка графовой метамодели системы предметных и теоретических моделей оптико- и лазерно-электронной системы. На основе метамодели решаются задачи идентификации и систематизации моделей системы в рамках связанного метаграфа. Между моделями существуют объективные связи, задаваемые рёбрами метаграфа, подграфы которого дают возможность различать одну модель от другой, как один вид вещества отличается от другого, и формируют математический прообраз системы моделей для проектирования, изготовления и исследования оптико-электронных приборов.

2. Разработка структурно-поведенческой ММ оптико- и лазерно-электронной системы как оптико-физической реализации математической структуры (1) и создание основ научного подхода к математическому моделированию системы. Построение в рамках ММ системы универсальной компьютерной ММ для любой компьютерно-предметной формы вычислительной машины и соответствующих модельных представлений процесса преобразования сигналов в оптико-электронных приборах.

3. Разработка графовой модели ветвления оптико- и лазерно-электронной системы с целью обоснования научных принципов классификации изделий оптического производства и построения классификационных категорий ветвления системы для идентификации основных типов оптико-электронных приборов.

4. Разработка факторизованной групповой структурной модели процесса преобра-

зования сигналов в оптико-электронных приборах с целью структурирования и типизации сигналов, а также построения топологических моделей поведенческого типа оптико- и лазерно-электронной системы и типа сигнала в приборах.

5. Разработка девятиэтапной орграфовой модели полного модельного синтеза оптико- и лазерно-электронной системы с целью создания инженерно-графовой методики для проектирования, изготовления и исследования оптико-электронных приборов на языке модельных представлений.

6. Разработка метода принципиальных оптических и голографических схем для визуальной идентификации процесса преобразования сигналов в оптических и голографических приборах как отображения множества сигналов в себя.

7. Создание двух ГОСТов по голографии.

8. Разработка и исследование на основе инженерно-графовой методики модельного синтеза оптико- и лазерно-электронной системы шести макетных образцов новых перспективных оптико-электронных приборов, экспериментально подтверждающих эффективность структурной теории и методики модельного синтеза.

9. Внедрение полученных результатов в практику научных и прикладных исследований и в учебный процесс.

Методы исследований. Для решения теоретических и прикладных задач использованы: системотехника оптико-электронного приборостроения и классический системный анализ; метод моделей, опирающийся на классические структурные модели и модели поведения, и прежде всего схемные, транспарантные, геометрооптические и алгоритмические модели; координатно-свёрточный и мультипликативный пространственно-частотный и частотно-временной подходы к описанию процесса преобразования сигналов в линейных инвариантных оптико-электронных системах; теория графов и графовые модели; теория групп и групповые модели.

Научная новизна и вклад исследования в разработку проблемы. Новизна состоит в создании научных основ структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем, которая формируется на стыке структуралистского направления математической теории систем и классической поведенческой теории и представляет собой совокупность новых научных положений. Автором разработаны язык, модели, методы и критерии структурной теории. Новизна теории, которая охватывает и пронизывает всю классическую теорию, включает в себя:

- методологию системно-модельного подхода к описанию процесса преобразования сигналов в оптико- и лазерно-электронной системе, основанную на перенесении определяющих понятий (прежде всего симметрии) математической теории систем на оптико-электронное приборостроение, применении аксиоматически-дедуктивного метода математической теории систем при моделировании процесса преобразования сигналов в оптико-электронных приборах и изучении его симметрии, построении и анализе различных моделей системы, а также использовании моделей для исследования трёх изучаемых видов симметрии: сигнальных подпространств, преобразующих элементов и инвариантного поведения системы;

- анализ и синтез структуры и поведения оптико- и лазерно-электронной системы в рамках четырёх аспектов: 1) что преобразуется в приборе, т.е. какие сигналы участвуют в преобразовании; 2) чем преобразуются сигналы, т.е. какие используются элементы; 3) в каком порядке осуществляется преобразование сигналов, т.е. какие структурные связи (т.е. графовые пути) существуют на множествах сигналов и элементов, которые конфигурируют прибор; 4) как задаётся процесс преобразо-

вания сигналов, т.е. какие модельные представления описывают поведение элементов и всего прибора, обусловленное их взаимодействием с сигналами, и тем самым задают поведенческую связность входных и преобразованных сигналов в оптико-электронных приборах (снова графовые пути);

- модельную оболочку классической поведенческой теории оптико- и лазерно-электронных систем, идентифицирующую систему предметных и теоретических моделей и задающую таксонную иерархическую систематику моделей на основе графовых целевых функций для разработки оптико-электронных приборов;

- структурную связность моделей, которая объединяет в единое целое различные разделы поведенческой теории оптико- и лазерно-электронных систем и задаёт структурную и поведенческую связность сигналов и преобразующих элементов в оптико-электронных приборах;

- графовый "ячеистый модельный каркас" структурной теории, устанавливающий порядок расчленения общей задачи проектирования по графовым окнам, слоям и цепям;

- общие принципы построения математических модельных представлений оптико- и лазерно-электронной системы для разработки и исследования оптико-электронных приборов и комплексов в рамках созданных новых математических моделей системы;

- научные принципы классификации оптико-электронных приборов на основе метода графового ветвления системы;

- идентификацию групповой структуры входного и преобразованного сигнальных подпространств при описании процесса преобразования сигналов в оптико- и лазерно-электронной системе с помощью трёх характеристических групп с целью факторизации (разбиения) подпространств на классы эквивалентности (типы сигналов в оптико-электронных приборах), построения классификационных фактор-категорий сигналов и оценки качества прибора по методу типовых сигналов;

- на основе методологии модельного синтеза оптико- и лазерно-электронной системы на языке модельных представлений впервые получена возможность формализовать и визуально в наглядном виде представить проектирование, изготовление и исследование оптико-электронных приборов как математические образы двух глобальных графовых целевых функций: связанного метаорграфа и девятиэтапного связанного орграфа. В результате последовательно-параллельных графовых модельных переходов как внутри окон и слоёв, так и между ними, в рамках трёх форм идентификации вершин связанного метаорграфа (вершины, окна, подметамоделей) выявляются прежде скрытые закономерности процесса проектирования, и тем самым устраняются субъективные ошибки и грубые промахи при проектировании. Впервые открывается возможность строить на научной основе новые ММ оптико- и лазерно-электронной системы; включать имеющиеся модели в банк ММ, рассматривая все подметодики расчёта системы как графовые модельные слои; создавать банк инженерных реализаций графовых метамоделей для модельного синтеза новых систем и использовать созданную ранее систему графовых модельных окон для похожей уже решённой задачи в виде маршрутной модельной карты, задающей алгоритм проектирования оптико-электронных приборов;

- на основе понятий типа сигналов в оптико-электронных приборах и типа голограмм введены принципиальные обозначения преобразующих элементов и слоёв регистрирующей среды, идентифицирующие свойства оператора поведения оптико- и лазерно-элек-

тронной системы, и построены принципиальные оптико-голографические схемы созданных систем, а также принципиальные схемы получения отдельных типов голограмм.

Научные положения, выносимые на защиту. Созданная на основе анализа сложившихся подходов к проектированию оптико-электронных приборов структурная теория оптико- и лазерно-электронных систем и проведённые на её основе разработка и исследование лазерно-электронных приборов для измерения геометрикооптических и физических параметров и характеристик оптико-технических объектов позволяют внести на защиту следующие новые положения и результаты:

1. Принципиально новая графовая метамодель системы предметных и теоретических моделей оптико- и лазерно-электронной системы как первый графовый математический прообраз процессов разработки и исследования оптико-электронных приборов. Метамодель состоит из объектов (моделей оптико-электронной системы) и отношений (связей между моделями) и визуализируется с помощью связанного метаграфа, идентифицирующего структурную связность ансамбля модельных представлений в рамках их таксонного соподчинения и образующего графовую модельную оболочку классической поведенческой теории. До построения метамодели совокупность существовавших предметных и теоретических моделей, образно говоря, напоминала "лоскутное одеяло".

2. Новые математико-теоретическая, или математическая модель (ММ), и компьютерно-теоретическая модель оптико- и лазерно-электронной системы. Построены полная структурно-поведенческая ММ и универсальная компьютерная ММ оптико- и лазерно-электронной системы для любой компьютерно-предметной формы вычислительной машины (ВМ). Созданы основы научного подхода к математическому моделированию оптико- и лазерно-электронной системы, который даёт современное глубинное понимание того, что значит взять реальный оптико-электронный прибор в "абстрактные математические руки".

3. Новая графовая модель ветвления оптико- и лазерно-электронной системы на основе десяти базисных графовых ветвей (физических подсистем). Введено дискретное трёхмерное классификационное пространство и идентифицированы классификационные категории ветвления оптико- и лазерно-электронных систем, которые лежат в основе научных принципов классификации изделий оптического производства. Предложен универсальный алгоритм классифицирования систем для выделения различных типов оптико-электронных приборов.

4. Факторизованная групповая структурная модель процесса преобразования сигналов в оптико- и лазерно-электронной системе, которая ранее не использовалась. Она задаёт групповую структуру входного и преобразованного сигнальных подпространств и отражает симметрию процесса преобразования сигналов в оптико-электронных приборах, лишённого случайных и несущественных факторов. На основе этой модели построены сигнальная и преобразованная классификационные фактор-категории и разработаны топологические модели поведенческого типа оптико- и лазерно-электронной системы и типа сигналов, содержащие отношения (связи на подтипах сигналов) и операторы (отображения подтипов). Идентифицирован бинарный тип сигналов в оптико-электронных приборах, как принципиально новый структурный критерий качества. Создан метод типовых сигналов, лежащий в основе любого исследования качества системы.

5. Ранее не существовавшая девятиэтапная оргграфовая модель как второй графовый математический прообраз процессов разработки и исследования оптико-электронных приборов. Оргграфовая модель лежит в основе методики модельного синтеза оптико- и

лазерно-электронной системы и содержит два раздела и девять этапов (окон). Модельный синтез, формализуя процесс проектирования приборов, сводится к заданию последовательно-параллельных графовых модельных переходов в рамках трёх форм идентификации вершин орграфовой модели: подмоделей, графовых модельных окон и графовых структурных целевых функций. Переходы, как внутри окон и слоёв, так и между ними идентифицируют ориентированные инженерные реализации двух глобальных графовых целевых функций для разработки оптико-электронных приборов: связанного метаграфа и девятиэтапного связанного орграфа над синтезируемой системой.

6. Метод принципиальных оптических и голографических схем, практически отсутствующих в оптическом приборостроении. Они определяют полный состав элементов и дают детальное представление о принципах работы в результате визуализации поведения оптической и голографической систем.

Совокупность научных положений составляет содержание структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем и лежит в основе достижения поставленной в работе цели. Структурная теория, являясь языком и средством классической теории оптико- и лазерно-электронных систем, согласно постулатам Н. Винера способна выражать сложные ситуации проектирования, изготовления и исследования оптико-электронных приборов в наглядной и сжатой форме и даёт возможность "подняться" над существующими приборами. Она идентифицирует стандартный метод постановки задачи модельного синтеза системы и метод выражения фактов задачи, который исключает случайный выбор координат, задавая указание с помощью каких моделей решать задачу проектирования. Научные положения подчёркивают фундаментальную значимость структурной теории и показывают, что заложенные в ней принципы структурного подхода являются мощным средством оптимизации при синтезе новых приборов, особенно связанных с созданием новых материалов и разработкой перспективных технологических инноваций.

Практическая ценность и область применения результатов исследования. Практическая ценность заключается в оригинальных структурно-функциональных схемах, моделях, алгоритмах, прикладных программах и инженерно-графовой методике модельного синтеза оптико- и лазерно-электронной системы для разработки оптико-электронных приборов. Теоретический фундамент структурной теории позволил создать два ГОСТа, а также разработать и исследовать шесть макетных образцов лазерно-электронных приборов для измерения геометрических и физических параметров, а также характеристик оптико-технических объектов:

- ❖ ГОСТ 24865.1-81. Голография и голографические методы контроля качества. Термины и определения;
- ❖ ГОСТ 24865.001-82. Голография и голографические методы контроля качества. Основные положения;
- ❖ два дифракционных лазерных фурье-толщинометры «САС-1» и «САС-2» для измерения толщины линз большого диаметра;
- ❖ лазерно-электронный измерительный фурье-стенд для измерения погрешностей оптического фурье-преобразования;
- ❖ голографический регистратор «СДВИГ» для получения голограмм регистрируемого изображения движущихся амплитудных транспарантов на синхронно перемещающемся фототермопластическом носителе;
- ❖ два лазерных оптодиаметрометра: когерентно-оптический измеритель

диаметра волокна «КОИД-1» на основе газового лазера и измеритель диаметра оптического волокна «ИДОВ» на основе полупроводникового лазера.

Разработанные в диссертации модели, методы, алгоритмы, программы и инженерно-графовая методика модельного синтеза используются для упорядочения, формализации и автоматизации этапов проектирования, изготовления и экспериментального исследования оптико-электронных приборов, а также для построения классификационных фактор-категорий сигналов и категорий ветвления оптико- и лазерно-электронных систем.

Внедрение. Результаты диссертации внедрены на предприятиях: ЦКБ "Спектр", ПО "Рубин", НПО "Геофизика", ЦНПО "Комета", ОАО «ЛЗЭС», ВНИИС, ВНИИ-стандарт, НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э.Баумана. Материалы работы использованы в учебном процессе в МГТУ им. Н.Э.Баумана в дисциплинах «Теория оптико-электронных систем», «Теория преобразования сигналов в лазерных оптико-электронных приборах», «Проектирование лазерных оптико-электронных приборов» и «Оптическая голография». Акты о внедрении и использовании приведены в диссертации.

Апробация работы. Результаты диссертации обсуждались на кафедре "Лазерные и оптико-электронные приборы" МГТУ им. Н.Э.Баумана. Основные положения работы доложены на: II Всес. Межвузовской НТК МВ и ССО СССР (Москва, 1973); Всес. НТК "Использование ОКГ в науке и технике" (Ленинград, 1973); Всес. НТС "Голографические методы обработки информации" (Киев, 1973); Всес. НТС "Оптическая голография" (Ленинград, 1974); Всес. НТК КМЗ (Красногорск, 1975); II (Москва, 1975), III (Москва, 1978) Всес. НТК "Современное состояние и перспективы высокоскоростной фотографии и кинематографии"; II (Киев, 1975), IV (Ереван, 1982) Всес. НТК по голографии; VI (Ереван, 1974), VII (Ростов Великий, 1975), VIII (Минск, 1976), IX (Тбилиси, 1977), XII (Пасанаури, 1980), XIV (Долгопрудный МО, 1982) Всес. школах АН СССР по голографии и XXV школе-симпозиуме РАН по когерентной оптике и голографии (Ярославль, 1997); I (Москва, 1976), II (Москва, 1979) Всес. НТК "Применение лазеров в приборостроении, машиностроении и медицинской технике"; Всес. симпозиуме "Оптическое приборостроение и голография" (Львов, 1976); II (Москва, 1976), IV (Москва, 1982), V (Москва, 1984), VI (Москва, 1988), VII (Москва, 1990) Всес. НТК "Фотометрия и её метрологическое обеспечение"; III Всес. НТК "Приборостроение" (Москва, 1977); I (Горький, 1978), III (Рига, 1980), IV (Минск, 1982) Всес. школах АН СССР по оптической обработке информации; I Всес. НТК "Проблемы управления параметрами лазерного излучения" (Ташкент, 1978); I (Могилёв, 1979), II (Кишинёв, 1985) Всес. НТК "Формирование оптического изображения и методы его коррекции"; Всес. НТК "Регистрирующие среды, методы и аппаратура голографии" (Кишинёв, 1980); I Всес. Межвузовской НТК "Оптические и радиоволновые методы и средства неразрушающего контроля" (Фергана, 1981); Всес. НТК "Оптическое изображение и регистрирующие среды" (Ленинград, 1982); Всес. НТК "Современные вопросы математики и механики и их приложения" (Москва, 1983); Всес. НТК "Робототехника и автоматизация производственных процессов" (Барнаул, 1983); II (Барнаул, 1984), III (Барнаул, 1986), IV (Барнаул, 1988), V (Барнаул, 1990) Всес. совещаниях "Оптические сканирующие устройства"; III (Барнаул, 1985), IV (Барнаул, 1987), V (Барнаул, 1989) Всес. совещаниях "Координатно-чувствительные фотоприемники"; Всес. НТК "Актуальные проблемы современного приборостроения" (Москва, 1986); Всес. НТС "Автоматизированное проектирование ОЭП" (Москва,

1987); I (Москва, 1987), II (Москва, 1988) Всес. НТК "Актуальные проблемы информатики, управления и вычислительной техники"; II Всес. НТК "Применение лазеров в технологии, системах передачи и обработки изображений" (Таллин, 1987); Всес. НТК "Актуальные проблемы информатики, управления, радиоэлектроники и лазерной техники" (Москва, 1989); Всес. НТК "Инженерно-физические проблемы новой техники" (Москва, 1990); VIII (п. Пушкинские горы, 1997), IX (Геленджик, 1998), X (Сочи, 1999), XI (Сочи, 2000), XII (Сочи, 2001), XIII (Сочи, 2002) Межд. НТК "Лазеры в науке, технике, медицине"; Межд. НТК "220 лет геодезическому образованию в России" (Москва, 1999); VII Всерос. НТК "Состояние и проблемы измерений" (Москва, 2000); Second Conference on Photonics for Transportation (Moscow, 2002).

Публикации и личный вклад. Все теоретические исследования по созданию структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем проведены лично автором. Язык, модели, методы, критерии структурной теории – всё здесь ново, всё получено впервые, всё изобретено, разработано, создано автором на кафедре РЛ-2 на протяжении тридцати лет. Практические приложения структурной теории получены совместно с Волосатовой Т.М., Животовским И.В., Короткевичем А.М., Одиновым С.Б. и Самуйловым С.А. Во всех случаях автор являлся инициатором постановки исследуемых задач и принимал непосредственное и ведущее участие в совместном их решении, обсуждении результатов и подготовке к публикации. Обсуждение результатов промежуточных исследований, поэтапное планирование текущих исследований и руководство разработкой макетных образцов полностью осуществлялось автором. При использовании в диссертации материалов других авторов приведены ссылки на литературные источники.

По теме диссертации опубликована 241 научная работа, в том числе, учебник для ВУЗов, монография, два ГОСТа, 6 учебных пособий, 10 авторских свидетельств и патент на изобретение, 54 статьи (из них 26 статей объёмом 29,2 п.л. без соавторов), труды 6-ти Всесоюзных школ АН СССР по голографии и оптической обработке информации, тезисы докладов на 32-х международных, Всесоюзных и Всероссийских НТК, 11-ти Всесоюзных совещаниях и семинарах. Материалы работы изложены также в 41-ом научно-техническом отчёте по НИР. Список основных публикаций приведён в конце автореферата.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, восьми глав, общих выводов и списка литературы. Работа изложена на 673 стр., содержит 137 рисунков и 13 таблиц. Список цитируемой литературы включает 431 источник.

Во введении обоснована актуальность проблемы, решаемой диссертации. Сформулированы цель и задачи исследований. Изложены научные положения, выносимые на защиту. Приведён обзор содержания диссертации по главам и дан обзор литературы.

В первой главе на основе системотехники оптико-электронного приборостроения и классического системного анализа проведён детальный анализ сложившихся подходов к проектированию оптико-электронных приборов и на базе общих принципов структурной и поведенческой связности сигналов и преобразующих элементов в оптико-электронных приборах создана методология системно-модельного подхода к описанию процесса преобразования сигналов в оптико- и лазерно-электронной сис-

теме. Этот подход представляет собой фундамент структурной теории, является развитием классического системного подхода в широком смысле и опирается на модельное представление системы в виде совокупности гомоморфных образов. В рамках такого подхода изучаемая система задана, если имеется какая-либо её модель, не обязательно математическая. Таким образом, в структурной теории "внемоделных" представлений системы нет, так что разработка теории начинается с построения системы М0 предметно-теоретических моделей над оптико- и лазерно-электронной системой и идентификации структурной связности модельных представлений в рамках графовой метамодели системы. Так как **графовая модель (ГрфМ)** задаётся бинарной реализацией математической структуры (1), то с учётом (2)

$$\text{ГрфМ} = \langle\langle \text{множества } S_k; \text{отношения } R_l \rangle\rangle. \quad (3)$$

Для решения прикладных задач оптико-электронного приборостроения построена первая основополагающая ММ структурной теории в виде **графовой метамодели (ГрфМетаМ)** системы предметных и теоретических моделей над оптико- и лазерно-электронной системой, визуализируемая с помощью связанного метаграфа 0, так что

$$\text{ГрфМетаМ} = \langle\langle S_0, \dots, S_k; R_1, \dots, R_l \rangle\rangle, \quad (4)$$

где $S_0, \dots, S_k$ – непустые множества вершин-моделей, на которых заданы отношения $R_1, R_2, \dots, R_l$ в виде рёбер, устанавливающих структурно-модельные связи. Введены три формы идентификации вершин связанного метаграфа 0: подметамодели, графовые модельные окна и графовые структурные целевые функции, и создан упорядоченный аббревиатурный модельный язык процесса проектирования оптико-электронных приборов. Система графовых модельных окон – это специфическое структурное модельно-графовое Windows-приложение, разработанное в структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем. Каждый модельный гомоморфизм в соответствующем графовом окне раскрывает определённые свойства системы. "Заглядывая" в графовые окна в процессе проектирования оптико-электронного прибора, разработчик выбирает подходящие модели для модельного синтеза системы. Связный метаграф 0 (знаковый образ графовой метамодели) разработан с целью построения в 4-ой главе методологии модельного синтеза и анализа создаваемой или изучаемой оптико- и лазерно-электронной системы на основе рабочих связанных орграфов. Выбор подметамодели, уточнение рабочего вида модели и возврат к предшествующим моделям при перемещении по графовым окнам, слоям и цепям идентифицируют пути разработки и исследования оптико-электронных приборов и комплексов в виде графовых структурных целевых функций.

Для формализации путей проектирования, изготовления и исследования создаваемых оптико-электронных приборов построена вторая основополагающая ММ структурной теории в виде графовой модели иерархического соподчинения модельных таксонов, используемых в научной систематике. Она визуализируется с помощью таксонной иерархической орцепи и идентифицирует исходные типы, кардинальные классы, главные когорты, основные семейства, базовые трибы, композиционные роды, рабочие (проектируемые) виды и реализуемые вариации моделей оптико- и лазерно-электронной системы. Показано, что графовая классификация моделей не только определяет место каждой модели в системе моделей, служит средством хранения и поиска информации о моделях, иденти-

фицирует свойства моделей, но и положена в основу разработки методологии модельного синтеза системы. В связанном метаграфе 0 введены три подграфа исходных типов моделей (исходные графовые целевые функции): предметных, теоретических и компьютерных моделей, так что модельная оболочка имеет вид графовых целевых функций для разработки оптико-электронных приборов, идентифицируемых элементами таксонной иерархической орцепи.

Хотя другого изложения графовой связности между моделями, используемыми при исследовании оптико- и лазерно-электронных систем (да и, по-видимому, других систем), автору не известно, при создании связанного метаграфа 0 проанализированы все различные трактовки ММ из работ, упомянутых в диссертации. В результате графовая метамодель системы предметных и теоретических моделей оптико- и лазерно-электронной системы формирует графовую модельную оболочку, состоящую из 292-х моделей (как известных, так и новых созданных автором и ранее не попадавших в поле зрения разработчиков).

Выделены два исходных направления моделирования оптико- и лазерно-электронных систем – предметное и теоретическое. В ходе предметного моделирования исследование проводят с помощью предметной модели, которая представляет собой материальную модель в виде реального технического объекта: стенда, прибора, машины, вычислительного устройства. При теоретическом моделировании как процесс преобразования сигналов, так и саму систему, описывают формализованно, осуществляя их идеальную имитацию на основе теоретической, или концептуально-знаковой, модели. Связный метаграф 0 устанавливает глубинную связь между предметными и теоретическими моделями с помощью компьютерных моделей. Идентифицируя компьютерную модель как функционирующую вычислительную машину, имеющую компьютерно-предметную форму и компьютерно-теоретическое содержание, в рамках компьютерного предметно-теоретического подграфа введено третье композиционное направление моделирования – компьютерное.

По способу реализации эксперимента на основе кардинальных графовых целевых функций идентифицированы три кардинальных направления предметного моделирования оптико- и лазерно-электронной системы. Первое обусловлено физическим (реальным), а второе – вычислительным (машинным, или компьютерным) экспериментом. На основе третьего комплексного направления предметного моделирования созданы модельные комплексы. Построены три кардинальных предметных модельных класса: предметно-физических, компьютерно-предметных и комплексных компьютерных предметно-физических моделей.

По аналогии с предметным моделированием в зависимости от способа проведения теоретического исследования выделены два кардинальных направления теоретического моделирования оптико- и лазерно-электронной системы, одно из которых опирается на вербально-знаковое теоретическое описание системы, а другое базируется на её фундаментальном математическом исследовании. Построены три кардинальных теоретических модельных класса: первый – документно-теоретический; второй – математико-теоретический; третий – компьютерно-теоретический. По направлению разработки и исследования оптико-электронных приборов и комплексов в первом кардинальном классе документных концептуально-знаковых

моделей идентифицированы шесть подклассов кардинальных модельных представлений инженерной документации: *1* – исходные документы; *2* – виды документации в зависимости от способа её выполнения; *3* – исполняемые реализации документа; *4* – схемная документация; *5* – конструкторская и технологическая документация; *6* – научно-техническая документация.

По направлению разработки и исследования ММ оптико- и лазерно-электронных систем во втором кардинальном классе математических концептуально-знаковых моделей выделены два кардинальных подкласса: структурно-поведенческие ММ и компьютерно-математические модели. С целью разработки основ научного подхода к математическому моделированию системы построена третья основополагающая **структурно-поведенческая (СтрПвднч) ММ**

$$\text{СтрПвднчММ} = \langle\langle S, \Sigma, R^5(x,y,z,\lambda,t), B, Q, G, U; R_1, \dots, R_l; P_1, \dots, P_n \rangle\rangle, \quad (5)$$

где $S = \{s\}$ и $\Sigma = \{\sigma\}$ – множества входных и выходных сигналов, заданных в пятимерном пространстве $R^5(x,y,z,\lambda,t)$; λ, t – длина волны и время; $B = \{b\}$, $G = \{g\}$, $Q = \{q\}$, $U = \{u\}$ – конечные множества преобразующих элементов, внутренних, внешних параметров и фазовых переменных соответственно.

Показано, что **структурно-поведенческая ММ (5)**, задающая связность сигналов и элементов, позволяет перейти от расплывчатого задания ММ системы как её приближённого описания с помощью математической символики к строгой формулировке ММ, в рамках которой: 1) основные множества идентифицируют сигналы, преобразующие элементы, а также параметры и характеристики, участвующие в процессе преобразования сигналов в оптико-электронном приборе; 2) отношения устанавливают структурную связность как стадий процесса преобразования сигналов, так и элементов оптико- и лазерно-электронной системы; 3) отображения задают поведенческую (функционально-преобразующую) связность между сигналами на входе и выходе, как элементов, так и системы. При этом полная структурно-поведенческая ММ системы – сочетание наглядного формализованного описания теоретической модели, имеющего документную концептуально-знаковую форму (5), и глубинного математического смысла структуры (R_l) и поведения (P_n) моделируемой оптико- и лазерно-электронной системы. Иначе говоря, с помощью **структурно-поведенческой ММ (5)** сформировано современное глубинное понимание того, что значит взять реальный оптико-электронный прибор в "абстрактные математические руки".

В рамках первого кардинального структурно-поведенческого подкласса идентифицированы четыре когорты главных ММ: внешних, внутренних, структурных ММ и ММ поведения. Построены три основных семейства структурных моделей: графовые, геометрические и факторизованные групповые структурные модели. Разработаны три основных семейства моделей поведения: алгоритмические, аналитические и динамические модели. Найдено, что симметрию поведения оптико- и лазерно-электронных систем идентифицируют четыре базовые трибы: свёрточных, ковариационных, корреляционных моделей и $\mathcal{F}$ -моделей поведения. Выделено подсемейство линейных аналитических моделей из трёх триб: геометрианоли-

тических, геометрооптических и транспарантных моделей, которые задают поведение оптических преобразующих элементов. Проанализировано основное поведенческое семейство динамических моделей, описывающих алгоритм решения дифференциальных уравнений поведения, в которых учтены фазовые переменные.

С целью создания математического и методического обеспечения при переходе к автоматизированным методам проектирования построена универсальная компьютерная (Кмптр) ММ, или ММ оптико- и лазерно-электронной системы в узком смысле, для любой компьютерно-предметной формы вычислительной машины (ВМ), так что $КмптрММ = \langle\langle \text{СтрПвднчММ или ДтКнцЗнкМ}; \text{СтрСхАлгртм}; \text{ОператрнВчслтСвязи} \rangle\rangle$, (6)

где СтрПвднчММ – структурно-поведенческая и ДтКнцЗнкМ – документная концептуально-знаковая модели; СтрСхАлгртм – структурная схема алгоритма; ОператрнВчслтСвязи – операторные вычислительные связи. Четвёртая основополагающая ММ структурной теории (6), переводит триадное представление компьютерно-математического моделирования $\langle\langle \text{Модель} - \text{Алгоритм} - \text{Программа} \rangle\rangle$, введённое А.А.Самарским, на тернарный язык Бурбаки-Колмогорова и идентифицирует структурные и поведенческие связи системы на языке компьютерно-предметной формы ВМ. С учётом принципа действия ВМ в рамках компьютерно-математического подкласса построены три главные когорты компьютерных ММ: измерительные, расчётные и расчётно-измерительные.

Разработано операторное модельное представление процесса преобразования сигналов в оптико- и лазерно-электронных системах. Введено понятие сигнального пространства как гладкого многообразия, точки которого суть n -мерные векторные информационные поля, определяющие закон изменения физических величин. Построены документные концептуально-знаковые модели операций "преобразование сигналов" и "функционального соответствия". Предложена модель операции "преобразование симметрии" и идентифицированы три вида симметрии оптико- и лазерно-электронной системы: симметрия преобразующих элементов; симметрия входного и преобразованного сигнальных подпространств; симметрия инвариантного поведения системы на всём сигнальном пространстве.

Во второй главе с целью обоснования научных принципов классификации оптико-электронных приборов продолжено создание научных основ структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем. Для выделения различных типов изделий оптического производства разработан метод графового ветвления системы и предложен универсальный алгоритм классифицирования. В результате разработки графовых модельных представлений построены классификационные категории В-САТ ветвления оптико- и лазерно-электронной системы. Введено классификационное понятие графовой ветви V_i , идентифицируемой с помощью физической подсистемы, которая эквивалентна конкретной части (фундаментальной типологической группировке) изделия оптического производства в смысле поведенческой, или функционально-преобразующей, связности между входными и выходными сигналами. В результате последовательного перехода от материи (поля и вещества) к процессам, моделирующим поведение системы, идентифицированы десять базисных классификационных ветвей: оптическая,

электронная, механическая, акустическая, магнитная, химическая, тепловая, ядерная, гравитационная и биологическая.

Построена пятая основополагающая ММ структурной теории в виде графовой модели (ГрФМ) ветвления оптико- и лазерно-электронной системы в рамках трёх признаков: m -арность ветвления (число базисных ветвей), n -сложность ветви (число уровней детализации) и k -связность между ветвями (тип отношения). Используя определение математической категории, идентифицирована шестая основополагающая ММ структурной теории – классификационная категория, так что

В-САТ = « ГрФМ ветвления ($Obt S_k$); отображения (морфизмы) $\mathcal{P}_n$ ». (7)

Категория (7) является бинарной реализацией тернарной математической структуры (1) в виде множества объектов $Obt S_k$ (графовых моделей ветвления системы и изделий производства) и совокупности всевозможных взаимно однозначных отображений $\mathcal{P}_n$ (морфизмов) эквивалентных классов ветвления друг в друга.

Разработано дискретное трёхмерное классификационное пространство из (m, n, k) -ячеек, в первом физически реализуемом октанте которого выделены m -арные n -сложные и k -связные типы изделий оптического производства. Пространство разделено (стратифицировано) на различные слои (страты), задающие виды k -связности: 1) нулевая ($k = 0$); 2) пассивная (нейтральная, $k = 1$); 3) полуактивная (управляющая, $k = 2$); 4) активная (проникающая, $k = 3$).

Идентифицированы полные унарные и бинарные классификационные категории из разных базисных ветвей. Исследованы иерархические уровни структурной n -сложности ветвей. Рассмотрены унарно-бинарные типы изделий оптического производства 1-го, 2-го и 3-го уровней сложности. Показано, что по числу рёбер ветвления бинарного типа существует только восемь реализуемых вариаций структурно различных бинарных типов оптико-электронных приборов. Приведены примеры бинарных подтипов оптико-механических приборов 3-го уровня оптической сложности. Они содержат 8 структурно различных вариаций: 1) тривиальные оптические "неизделия"; 2) осветительные; 3) наблюдательные; 4) регистрирующие; 5) наблюдательно-регистрирующие; 6) осветительно-наблюдательные; 7) осветительно-регистрирующие (локационные); 8) осветительно-наблюдательно-регистрирующие (комплексные).

В третьей главе показано, что структурирование и типизация сигналов в оптико-электронных приборах адекватно описываются на языке теории групп. В рамках развития научных основ структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем идентифицирована групповая структура входного S и преобразованного Σ сигнальных подпространств с помощью трёх характеристических групп $\{GS, H, GS/H\}$ и $\{G\Sigma, T, G\Sigma/T\}$ для описания процесса преобразования сигналов. Введены собственные инвариантные подгруппы H и T в сигнальной $GS \supset H$ и преобразованной $G\Sigma \supset T$ группах, обуславливающие разбиение этих групп на входные $S_r^H := \{s\} = r + H$ и преобразованные $\Sigma_p^T := \{\sigma\} = \sigma T$ классы эквивалентных сигналов в оптико-электронных приборах (элементы фактор-групп

GS/H и $G\Sigma/T$). Построена седьмая основополагающая ММ структурной теории в виде факторизованной групповой структурной модели (ФактрзГрупСМ) процесса преобразования сигналов в оптико- и лазерно-электронной системе

$$\text{ФактрзГрупСМ} = \langle\langle \text{GS}, \text{H}, \text{GS}/\text{H}; \text{G}\Sigma, \text{T}, \text{G}\Sigma/\text{T}; (r, \text{H}, S_r^H), (\rho, \text{T}, \Sigma_\rho^T); (s, \sigma = \mathcal{P}(s)); (S_r^H, \mathcal{P}[S_r^H], \mathcal{P}^{-1}[\Sigma_\rho^T], \Sigma_\rho^T); \Psi_s, \mathcal{P}, \Psi_\sigma \rangle\rangle, \quad (8)$$

где Ψ_s и Ψ_σ – канонические гомоморфизмы групп GS и $G\Sigma$ на соответствующие фактор-группы; $\mathcal{P}$ – оператор поведения оптико- и лазерно-электронной системы. Факторизация (разбиение) подпространств на классы эквивалентности идентифицирует структурную связность между сигналами и классами сигналов в оптико-электронных приборах с помощью бинарных и тернарных отношений, выражая как симметрию параметрических полей в сигнальных подпространствах, так и симметрию инвариантного поведения реальной системы (симметрию процесса преобразования сигналов). Показано, что так как факторизованная групповая структурная модель отражает процесс, лишённый всякого рода случайных и несущественных факторов, то в такой модели, опираясь на формальный язык теории групп, можно производить действия, которые невозможны на других языках (например, говорить о сумме, произведении или какой-либо иной композиции типов входных или преобразованных сигналов), и тем самым получать новые сведения о структуре процесса преобразования сигналов.

Построена восьмая основополагающая ММ (9) структурной теории в виде топологической модели бинарного поведенческого типа оптико- и лазерно-электронной системы. Он представляет собой конфигурацию трёх унарных подтипов: сигнального подтипа S_r^H , фиксированного операторно-поведенческого подтипа $\mathcal{P}$ и преобразованного подтипа Σ_ρ^T , так что

$$\text{Бинарный поведенческий тип} = \langle\langle S_r^H, \mathcal{P}^{-1}[\Sigma_\rho^T], \mathcal{P}, \mathcal{P}[S_r^H], \Sigma_\rho^T; (S_r^H, \mathcal{P}[S_r^H]), (\mathcal{P}^{-1}[\Sigma_\rho^T], \Sigma_\rho^T), (S_r^H, \Sigma_\rho^T \triangleq \mathcal{P}[S_r^H]) \rangle\rangle. \quad (9)$$

Последнее третье бинарное отношение в (9) идентифицирует завершённое в смысле согласования групповых симметрий инвариантное поведение оптико- и лазерно-электронной системы и лежит в основе введения бинарного типа сигналов (БинарнТС) (10) как принципиально нового *структурного критерия качества* ($\mathcal{P}$ -СКК), задающего факторизованные свойства сигнального S и преобразованного Σ подпространств, так что

$$\text{БинарнТС} = \mathcal{P}\text{-СКК} = \langle\langle (S_r^H, \Sigma_\rho^T); \mathcal{P} \rangle\rangle. \quad (10)$$

Девятая основополагающая ММ (10) структурной теории в виде топологической модели бинарного типа сигналов является структурно критериальной бинарной реализацией математической структуры (1), содержащей только отношения (S_r^H, Σ_ρ^T) и операторы поведения $\mathcal{P}$, переводящие сигнальный подтип в преобразованный, так что с учётом (2)

$$\text{БинарнТС} = \langle\langle \text{отношения (связи)} R_i; \text{отображения (операторы поведения)} \mathcal{P} \rangle\rangle. \quad (11)$$

В рамках бинарного типа сигналов конкретизированы входной S_r^H и преобразо-

ванный Σ_p^T подтипы сигналов (классы эквивалентности), построены сигнальная $F-CAT_s = \{S_r^H\}$ и преобразованная $F-CAT_\Sigma = \{\Sigma_r^T\}$ классификационные фактор-категории на сигнальных подпространствах и приведены примеры. Рассмотрены смешанная аддитивная фактор-категория регулярных и случайных сигналов и её фактор-подкатегории. В результате прогностического введения усиливающих транспарантов построена транспарантная группа GT_Γ и разработана амплитудно-фазовая мультипликативная фактор-категория транспарантных сигналов. Проведены амплитудная и фазовая факторизации транспарантной группы и показана ортогональность (независимость) амплитудных и фазовых типов транспарантов.

Показано, что так как качество процесса преобразования сигналов в оптико- и лазерно-электронной системе неразрывно связано с его структурой, то такой подход даёт принципиально новую расширенную оценку качества. Введение **бинарного типа сигналов** устанавливает связь качества и структуры, конфигурируя простейшие в групповом смысле упорядоченные классы S_r^H входных и преобразованных Σ_p^T сигналов. Найдено, что *структурный критерий качества* является обобщением идеи количественного критерия качества и лежит в основе введения всех количественных критериев качества как количественных свойств сигнального, операторного и преобразованного подтипов, позволяя переносить трудно решаемые вопросы оценки качества с одной компоненты триады на другую.

Для количественной оценки качества процесса преобразования сигналов в оптико- и лазерно-электронной системе разработан *метод типовых сигналов* $\{mc\}$, симметрия которых согласована (совпадает) с симметрией элемента или всей системы. Создание этого *метода* решает проблему согласования пространственно-временных симметрий сигнального S и преобразованного Σ подпространств, а также преобразующих элементов и системы. Получено, что *триадный типовой сигнал* $\{mc\}$, являющийся представителем **типа сигнала** $TC = \langle\langle\{mc\}\rangle\rangle$, задаётся симметризованной реализацией **бинарного поведенческого типа** системы как *типового структурного критерия качества*, так что с учётом (10)

$$\text{Бинарн}TC = \langle\langle\{bmc\}\rangle\rangle = \langle\langle\{vmc; P, nmc\}\rangle\rangle = \langle\langle\{S; P, \sigma\}\rangle\rangle, \quad (12)$$

где *bmc*, *vmc*, *nmc* – бинарный, входной, преобразованный типовые сигналы соответственно. Показано, что в структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем качество процесса преобразования сигналов определяется способностью системы формировать тот или иной **тип сигнала**, а задача оценки качества требует отыскания характеристических *типовых сигналов*, определяющих выбор рациональных количественных критериев качества. Найдено, что такой структурный подход лежит в основе любого рода исследования качества системы. При этом чем лучше конкретный *типовой сигнал* отвечает условиям симметрии решаемой задачи, тем полнее он оценивает качество процесса преобразования сигналов. В результате в рамках структурной теории больше не ставится вопрос о существовании вообще способа оценки качества, а меняется сама постановка задачи. Теперь спрашивается, есть ли основания считать, что качество процесса преобразования сигналов в оптико- и лазерно-электронной системе можно полно (и насколько

полно) оценить с помощью определенного типа сигнала? Какие *типовые сигналы* делают задачу оценки качества системы разрешимой, в каком смысле и как их находить? Приведены примеры *типовых сигналов*.

В четвёртой главе с целью проектирования, изготовления и экспериментального исследования оптико-электронных приборов на языке модельных представлений создана методология модельного синтеза оптико- и лазерно-электронных систем (в широком смысле), которая завершает построение научных основ структурной теории. Показано, что в рамках тотального графового единства всех существующих моделей системы постановка задачи модельного синтеза сводится к решению графовых модельных задач в результате задания последовательно-параллельных графовых модельных переходов, как внутри модельных окон и слоёв связанного метаграфа 0, так и между ними. Для этого введены принципиально новые графовые структурные целевые функции (пути проектирования), глобальные для всего процесса модельного синтеза и локальные для каждого этапа.

Первая глобальная графовая целевая функция 0.1 представляет собой графовый математический прообраз синтезируемой системы предметных и теоретических моделей в виде связанного метаграфа 0, содержащего подметамодел, графовые модельные окна и локальные графовые целевые функции. Получено, что переходы от одной модели к другой приводят к достижению первой глобальной цели модельного синтеза — построению реализации глобальной целевой функции 0.1 в виде ориентированного связанного метаорграфа над синтезируемой оптико- и лазерно-электронной системой. Найдено, что пути разработки и исследования оптико-электронных приборов с помощью моделей (локальные графовые целевые функции) в рамках девяти этапов (окон) инженерно-графовой методики модельного синтеза задаются подграфами в виде совокупности рёбер, целей и циклов. Модельный связанный метаорграф конкретной системы, представляющий собой инженерный математический образ связанного метаграфа 0, формирует "графовый ячеистый модельный каркас" строения, функционирования, моделирования, изготовления и экспериментального исследования разрабатываемого прибора. Он показывает, что на каждом из девяти этапов модельного синтеза системы действия разработчика должны быть направлены на различные цели.

Для оптимального увязывания целей модельного синтеза построена десятая основополагающая ММ структурной теории в виде девятиэтапной орграфовой модели. Она визуализируется с помощью девятиэтапного связанного орграфа 0, или второй глобальной графовой целевой функции 0.2 и формализует процесс проектирования, изготовления и исследования оптико-электронных приборов, рассматриваемый как графовый математический образ целевой функции 0.2. В результате создание новых приборов осуществляется в рамках построения второй глобальной структурной цели модельного синтеза — конкретного этапного связанного орграфа для синтезируемой системы. Он является инженерным математическим образом девятиэтапного связанного орграфа 0 и идентифицирует девятиэтапную инженерно-графовую методику полного модельного синтеза.

Основной задачей модельного синтеза оптико- и лазерно-электронной системы, определяющего порядок расчленения процессов проектирования, изготовления и

исследования оптико-электронного прибора по окнам, слоям и цепям связанного метаграфа 0 в рамках девятиэтапного связанного орграфа 0, является задача проектирования. Создаваемый "*графовый модельный каркас*" объединяет и структурно увязывает как новые, так и имеющиеся в распоряжении и часто бессистемно используемые известные ММ, методы и подходы к проектированию и даёт ответ на основной вопрос теории проектирования. Что общего в проектировании разнородных приборов, таких как лазерно-электронное измерительное устройство, голографический прибор, интерферометр, лазерный локатор, тепловизор, прибор ночного видения и т.п.? И в то же время, в чём всё-таки проявляются специфические особенности проектирования конкретного оптико-электронного прибора? Основные положения процесса проектирования идентифицированы в наглядной концептуально-знаковой форме при разработке двух глобальных графовых целевых функций 0 (математических преобразов): связанного метаграфа 0 и девятиэтапного связанного орграфа 0 над обобщённой оптико- и лазерно-электронной системой. В то же время специфика трактовки проектирования реального оптико-электронного прибора отражена в рамках конкретных математических образов этих функций в виде связанного метаорграфа и этапного связанного орграфа над синтезируемой системой (см. главы 5 – 8).

С целью формализации процесса проектирования девятиэтапный связный орграф 0 представлен в виде *двух разделов* и девяти этапов. В *разделе I* идентифицирована инженерно-графовая методика проектирования оптико-электронных приборов (теоретическое изучение проблемы, расчёты и конструирование) как проектная реализация полного модельного синтеза оптико- и лазерно-электронной системы, содержащая семь этапов: 1 – документно-постановочный; 2 – документно-схемный, формирующий схемный каркас; 3 – структурно-поведенческий математический, опирающийся на "графовую сборку" моделей; 4 – компьютерно-предметный; 5 – компьютерно-математический; 6 – документно-конструкторский; 7 – документно-технологический. *Раздел II* посвящён изготовительно-экспериментальной реализации модельного синтеза из двух этапов: 8 – изготовительного; 9 – экспериментального.

Таким образом, в структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем классический процесс проектирования (разработка документации) формализован как проектная реализация полного модельного синтеза, на основе которой создают документные концептуально-знаковые модели и ММ рабочего вида или реализуемой вариации кардинального предметно-физического класса моделей системы, идентифицирующих стендовое, приборное, машинное или комплексное проектное решение. *С одной стороны*, модельный синтез переводит проектирование на модельный язык на основе этапного графового использования модельных представлений связанного метаграфа 0, *а с другой*, – в рамках трёх форм идентификации метаграфа 0 (подметамоделей, графовых модельных окон и структурных графовых целевых функций) – упорядочивает проектирование. В результате модельный синтез восстанавливает наглядность процесса проектирования, которая в последнее время всё больше теряется.

Девять этапов (окон) в рамках *девятиэтапной орграфовой модели* структурной теории подчёркивают итерационный характер полного модельного синтеза оптико- и лазерно-электронной системы. Последующий этап продолжает предыдущий, являясь его логическим следствием, так что результаты предшествующего этапа по-

зволяют ставить и решать задачи последующего этапа. Выводы из последующих этапов с помощью обратных графовых связей позволяют корректировать предшествующие результаты. На основе отдельных этапов в рамках системы графовых модельных окон разработчик видит, что он сделал, а что упустил, на что в первом варианте разработки можно не обращать внимания, а что может дать принципиально новые результаты. Более того, разработчик может перебирать этапы модельного синтеза, отделяя тем самым главное от второстепенного.

Показано, что инженерно-графовая методика полного модельного синтеза оптико- и лазерно-электронной системы как фундаментальный практический выход структурной теории является существенным шагом в создании научных основ современного оптико-электронного приборостроения и даёт возможность:

- 1) в наглядном виде представить процесс проектирования, изготовления и исследования оптико-электронного прибора от замысла (концептуальная модель) до сборки готового изделия (предметно-физическая вариация) и в большинстве случаев отказаться от дорогостоящего натурного физического моделирования, перенося этот процесс в рамки математического моделирования;
- 2) эффективно увязать цели модельного синтеза (в широком смысле) в рамках принципиально новых графовых целевых функций, а числовые целевые функции использовать в рамках модельного синтеза (в узком смысле), оптимизирующего конкретную модель системы, и тем самым избежать субъективных ошибок и грубых промахов в процессе проектирования;
- 3) выделить и объяснить в результате визуального подхода к проектированию прежде скрытые закономерности;
- 4) включить в себя все подметодики расчёта системы как графовые модельные слои, что облегчает восприятие проектной сущности задачи;
- 5) создать банк инженерных реализаций базовых орграфовых метамоделей и девятиэтапных связных орграфов, что позволит автоматизировать процесс разработки и исследования оптико-электронных приборов;
- 6) воспользоваться созданной ранее системой графовых модельных окон для уже решённой задачи, используя её как маршрутную модельную карту, задающую алгоритм проектирования, и тем самым сократить время разработки.

Получено, что в результате объединения данных из разных моделей с помощью графового каркаса (графовой мозаики) можно делать реальные шаги в проектировании, изготовлении и исследовании новых оптико-электронных приборов. Если раньше для лучшего понимания принципов работы прибора требовалась модельная специализация по различным наукам, то в рамках структурной теории достигнут такой уровень разработки модельных представлений, когда всестороннее исследование проблемы в рамках методологии модельного синтеза базирется на разработке системы предметных и теоретических моделей и построении графовых целевых функций.

В пятой (5-ой), шестой (6-ой), седьмой (7-ой) и восьмой (8-ой) главах рассмотрены практические применения научных основ структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем с целью модельного синтеза (в широком смысле) четырёх дифракционных лазерно-электронных систем: системы 5 измерения толщины линз большого диаметра; системы 6 измерения погрешностей оптического фурье-

преобразования в когерентном спектроанализаторе; голографической изображающей системы 7 получения голограмм растриванного изображения; системы 8 измерения диаметра оптического волокна. Для достижения поставленной предметной цели в рамках методологии модельного синтеза оптико- и лазерно-электронной системы для каждой из четырёх систем создана реализация инженерно-графовой методики полного модельного синтеза и все девять этапных окон наполнены моделями.

На первом документно-постановочном этапе идентифицирован рабочий модельный вид объектов проектирования: дифракционный лазерно-электронный измеритель 5 толщины линз; измеритель 6 погрешностей оптического фурье-преобразования; голографический регистратор 7; измеритель 8 диаметра оптического волокна. Решены частные задачи построения инженерных реализаций глобальных графовых структурных целевых функций 0.1 и 0.2 в виде графовых математических образов: связанных метаорграфов 5 – 8 систем М5 – М8 предметных и теоретических моделей над синтезируемыми системами и девятиэтапных связанных орграфов 5 – 8 проектируемых лазерно-электронных приборов. В результате инженерные реализации графовой методики полного модельного синтеза сведены к заданию последовательно-параллельных модельных переходов в рамках связанных метаорграфов 5 – 8 над четырьмя синтезируемыми системами и соответствующему модельному наполнению девяти окон конкретных этапных связанных орграфов 5 – 8. В рамках трёх форм идентификации вершин связанных метаорграфов 5 – 8 (подметамоделей, графовых модельных окон и структурных графовых целевых функций) сформированы *"графовые ячеистые модельные каркасы"*, устанавливающие порядок расчленения задачи модельного синтеза четырёх конкретных систем по графовым окнам, слоям и цепям. Найдено, что на каждом этапе в основе идентификации необходимых моделей лежат соответствующие графовые целевые функции. На основе предметной и теоретической исходных графовых целевых функций на первом этапе разработаны ТЗ на каждую дифракционную лазерно-электронную систему, сформулированы технические предложения, обоснованы основные исходные данные (режимы работы, измеряемые параметры и характеристики, оценка внешних факторов и др.) и определены предметные цели моделирования.

На втором документно-схемном этапе модельного синтеза систем в результате анализа и согласования симметрий лазерно-электронных систем построены структурно оптимальные типовые сигналы. На их основе предложены оригинальные ранее не существовавшие схемные прообразы создаваемых лазерно-электронных приборов в виде парадигм структурных, функциональных и принципиальных схем. В рамках созданного схемного фундамента разработаны методы и средства измерения, идентифицирующие структуру и поведение синтезируемых систем. Выделены стадии функционирования, способы регистрации результатов, проведена оценка внешних факторов и т.д. Созданы банк преобразующих элементов и банк комплектующих изделий. Дано обоснование дополнительных исходных данных.

На третьем структурно-поведенческом математическом этапе модельного синтеза в рамках математической графовой целевой подфункции разработаны необходимые математические модели дифракционных лазерно-электронных систем. Построены

внешние и внутренние структурные модели лазерно-электронных приборов и идентифицированы связные орграфы. С их помощью в результате "графовой модельной сборки" созданы алгоритмические модели поведения четырёх синтезируемых систем.

На четвертом компьютерно-предметном и пятом компьютерно-математическом этапах модельного синтеза на основе исходной графовой компьютерной целевой функции проведено компьютерное моделирование лазерно-электронных систем. В рамках кардинальной компьютерно-математической подфункции с помощью алгоритмических моделей разработаны компьютерно-математические образы четырёх синтезируемых систем. Построены расчётные компьютерно-математические модели.

На шестом документно-конструкторском и седьмом документно-технологическом этапах модельного синтеза на основе конструкторской целевой подфункции завершён процесс проектирования создаваемых лазерно-электронных приборов. В рамках документных концептуально-знаковых моделей разработана конструкторская (КД) и технологическая (ТД) документация и идентифицированы проектные и рабочие КД-подокна.

После проведения семи этапов раздела I инженерно-графовой методики проектирования осуществлён переход к завершающим этапам полного модельного синтеза в рамках изготовительно-экспериментального раздела II. На основе разработанных методик на восьмом изготовительном этапе под руководством автора спроектированы и изготовлены шесть макетных образцов четырёх синтезируемых лазерно-электронных систем. На девятом экспериментальном этапе в результате компьютерного и физического моделирования созданы банки данных и накоплена научно-техническая документация, которая описывает процесс функционирования созданных систем. Разработаны методики измерений и обработки данных и вычислены погрешности. На основе сравнения теоретических и экспериментальных результатов дана оценка эффективности созданных макетных образцов с целью анализа их качества и последующей доработки.

В пятой главе разработана инженерно-графовая методика модельного синтеза дифракционной лазерно-электронной системы 5 измерения толщины линз большого диаметра ($500 \div 1000$ мм) вдоль оптической оси. Она позволяет визуально в наглядном виде представить процесс проектирования, изготовления и исследования разрабатываемого лазерного толщиномера от замысла (концептуальная модель) до сборки готового изделия. Показано, что особенностью модельного синтеза системы 5 является построение на основе квинтарного парадигмального структурно-функционального схемного каркаса графовой модели ветвления этой системы, лежащей в основе идентификации внешней структурной модели и служащей для вложения системы в тернарную классификационную категорию оптико-электронных систем.

В рамках оптимального увязывания целей модельного синтеза проведено согласование симметрий контролируемой линзы и оптической фуры-преобразующей системы. Построен структурно оптимальный измерительный типовой фуры-сигнал для бесконтактного дифракционного контроля толщины линзы. Предложена оригинальная функциональная схема ранее не существовавшего лазерного фуры-толщиномера для формирования этого фуры-сигнала. Входной типовой фуры-сигнал имеет вид амплитудного коэффициента пропускания двумерной щели, симметрия которого согласована с симметрией фуры-преобразующего объекта. Он индуцирует плоскостную симметрию преобразованного типового фуры-сигнала и

устраняет произвол в выборе системы координат. Найдено, что в силу плоскостной симметрии типового фурье-сигнала описание процесса преобразования сигналов в рамках внешней структурной модели сводится к трансформации плоской волны в одномерное распределение интенсивности в выходном модельном пространственно-частотном спектре.

На основе визуального подхода к математическому моделированию лазерного фурье-толщиномера с помощью квинтарной парадигмы геометрикооптических моделей слоев пространства построен цветной связный орграф внутренней структурной модели, идентифицирующий поведенческую структуру толщиномера и состоящий из 21-ой подмодели поведения. Цветной орграф объясняет прежде скрытые закономерности процесса преобразования сигналов, так как вершины орграфа суть подмодели элементов разного уровня оптической сложности, а ориентация ребер показывает направление распространения сигнала.

В результате "графовой сборки" синтезирована двумерная алгоритмическая модель лазерно-электронной системы 5, которая включена в банк ММ структурной теории. С помощью построенной модели рассчитаны измерительный пространственно-частотный спектр и распределение интенсивности в плоскости двумерной щели.

В итоге в рамках двух разделов модельного синтеза спроектирован, изготовлен и исследован первый макетный образец дифракционного лазерно-электронного фурье-толщиномера «САС-1», который имел уникальные на время создания характеристики. Он предназначен для бесконтактного оптического контроля дифракционным методом геометрических размеров (прежде всего толщины вдоль оптической оси) оптических деталей, таких как крупногабаритные линзы, призмы и плоскопараллельные пластины, в диапазоне 50...100 мм с погрешностью ± 2 мкм $[(0,008 \div 0,004)\%]$. На основе уточнения параметров математических подмоделей создан второй образец фурье-толщиномера «САС-2», в котором диапазон измеряемых толщин расширен до 50...200 мм, а погрешность уменьшена до $\pm 1,5$ мкм $[(0,006 \div 0,0013)\%]$.

Принцип действия фурье-толщиномера состоит в формировании преобразованного типового фурье-сигнала в задней фокальной плоскости фурье-преобразующего объектива в виде модельного пространственно-частотного спектра в результате оптического фурье-преобразования волны, дифрагировавшей на трёхмерной композиционной щели "измерительный нож – линза". Ширина и положение дифракционных порядков регистрируемого спектра однозначно определяются шириной плоской двумерной щели. Измерение толщины линзы проводится в полуавтоматическом режиме абсолютным или косвенным способом на основе сравнения положений нулей регистрируемого спектра с положениями нулей модельного спектра эталонной детали. В итоге формируется сигнал, несущий информацию о толщине контролируемой линзы. Измерительная информация представлена в виде графиков нормированных пространственно-частотных спектров, которые хранятся в банке данных и выводятся на экране дисплея. Фурье-толщинометры защищены АС и внедрены на приборостроительном предприятии "ЛЗОС".

В шестой главе создана инженерно-графовая методика модельного синтеза дифракционной лазерно-электронной системы 6 измерения погрешностей оптического фурье-преобразования в когерентном спектральном анализаторе. Найдено, что особенностью модельного синтеза лазерно-электронной системы 6 является введение в рамках тернарной подпарадигмы функциональных оптических схем ис-

ходной аддитивной группы комплексных амплитудных дифракционных порядков.

В результате анализа симметрии оптической фурие-преобразующей системы впервые поставлена и решена задача измерения погрешностей оптического фурие-преобразования с помощью метода типовых фурие-сигналов. На основе этого метода предложена оригинальная функциональная схема ранее не существовавшего лазерно-электронного фурие-стенда, формирующего измерительный типовой фурие-сигнал. В нём входной типовой фурие-сигнал трансформируется в преобразованный типовой фурие-сигнал в виде измерительного модельного пространственно-частотного спектра.

С помощью классической модели поведения оптической фурие-преобразующей системы разработана факторизованная групповая структурная модель оптического фурие-преобразования в результате построения сигнальной и преобразованной инвариантных подгрупп в виде прямых сумм типовых подгрупп (классов эквивалентности). Она описывает групповую симметрию фурие-системы и задаёт $\mathcal{F}$ -структурный критерий качества как бинарный тип фурие-сигналов, состоящий из сигнального, преобразованного и операторного фурие-подтипов. Создана квинтарная парадигма топологических моделей $\mathcal{F}$ -структурного критерия качества с целью формирования структурно оптимального бинарного типового фурие-сигнала на основе разработанного метода спуска по подгруппам, опирающегося на критерии единичного контраста и монотонной определённости модельного пространственно-частотного спектра. В нём идеальный входной типовой фурие-сигнал, реализуемый в виде двойного δ -типового сигнала Юнга, трансформируется в преобразованный типовой фурие-сигнал в виде модельного косинусоидального пространственно-частотного спектра.

В итоге в рамках двух разделов модельного синтеза спроектирован, изготовлен и исследован дифракционный лазерно-электронный измерительный фурие-стенд с уникальными на время создания характеристиками. Он предназначен для оценки качества фурие-преобразующих объективов с фокусными расстояниями 10...1000 мм в результате измерения погрешностей с частотным разрешением 0,1...5 мм⁻¹ в диапазоне 0...200 мм⁻¹.

Принцип действия фурие-стенда заключается в оптическом фурие-преобразовании реального входного *2sigc-типового фурие-сигнала* с помощью контролируемого фурие-преобразующего объектива в преобразованный типовой фурие-сигнал в виде модельного пространственно-частотного спектра. Регистрируемый выходной спектр формируется в результате дифракции плоской волны на тест-диафрагме с двумя круглыми отверстиями (опыт Юнга), представляет собой *besinc*, растриванный *cos-ом*, и идентифицирует измерительную дискретную структуру дифракционных порядков. На его основе выработаны принципиально новые (вообще ранее не существовавшие) количественные критерии качества оптического фурие-преобразования: интегральный критерий качества, частотные и энергетические погрешности, а также контраст пространственно-частотного спектра. С помощью этих критериев косвенным образом в полуавтоматическом режиме оцениваются погрешности оптического фурие-преобразования путём вычисления количественных различий регистрируемого спектра от эталонного. Введённые количественные критерии качества оптического фурие-преобразования вычислены для 12-ти фурие-преобразующих объективов и создан банк экспериментальных графиков на основе этих критериев.

Проведён анализ точности метода измерения погрешностей и построен связный оргграф понятийной системы погрешностей, задающей структурный, функциональный и принципиальный слои детализации погрешностей. Оргграф идентифицирует все причины неисправностей и отказов в работе. Метод и фурье-стенд (средство измерения), защищённые АС на способ и двумя АС на устройство, внедрены в НПО "Геофизика". Методики измерения погрешностей по методу типовых фурье-сигналов и оценка качества на основе введённых количественных критериев внедрены в ЦНИО "Комета".

В **седьмой главе** разработаны модельные представления голографической изображающей системы, идентифицирующие разработку и исследование голографических приборов. Построена сетчатая парадигма структурных схем интерферометрического и голографического процессов, оттеняющая их сходство и отличие, а также проникновение друг в друга. Показано, что интерферометрическая система всегда хранила в себе элементы голографической, а непонимание этого структурного факта, по мнению автора, надолго задержало открытие голографии.

Идентифицирована аддитивная групповая структура голографического интерференционного поля, и в частности, классического интерференционного поля, и на основе голографической и голограммной инвариантных подгрупп построена факторизованная (разбивающая поле на части – классы эквивалентных сигналов) групповая структурная модель голографического процесса. Это привело к созданию модели тернарного типа голограммы, состоящего из голографического, регистрационного и голограммного подтипов (голографическая реализация структурного критерия качества). Введено матричное представление амплитудных коэффициентов пропускания и отражения голограммы и построена подгруппа треугольных амплитудных голограммных транспарантных матриц, след которых равен интерференционному члену. Показано, что на стадии восстановления треугольной матрицы формирует шесть дифракционных порядков (три прошедших и три отражённых), которые идентифицируют выбор подтипа (например, голограммное обращение волнового фронта). Построены дифракционно-голографическая и реконструкционно-голограммная классификационные фактор-категории. Идентифицированы голограмма растриваемого изображения, усиливающая, фурье-подобная и контрфурье-голограмма. Для визуализации поведения оптических и голографических изображающих систем создан метод принципиальных оптико-голографических схем, практически отсутствующих в оптическом приборостроении. Разработана голографическая схемная парадигма арности 13 структурных, функциональных и принципиальных схем.

Факторизованная групповая структурная модель, тернарный тип голограммы, фактор-категории и индуцируемые ими графы понятийных систем по разделам голографии и регистрирующим средам внедрены во ВНИИ Стандартизации (1990г). Созданы не имеющие зарубежных аналогов два ГОСТа, установлена единая терминология, выделены определяющие параметры и характеристики голографического процесса и идентифицированы технические требования на разработку голографических методов контроля качества.

Разработана инженерно-графовая методика модельного синтеза голографической изображающей системы 7 получения голограмм растриваемого изображения равномерно движущихся амплитудных транспарантов на синхронно перемещающийся фототермопластический носитель. В результате согласования симметрий оптической изображающей системы, фурье-преобразующего объектива, пространственно-частотного

фильтра и голографического интерференционного поля найден структурно оптимальный типовой голографический сигнал и идентифицирована голограмма растриванного изображения. Предложена оригинальная функциональная схема ранее не существовавшего голографического регистратора для получения голограммы растриванного изображения на основе формирования типового голографического сигнала. Показано, что особенностью модельного синтеза системы 7 является визуальный подход к её математическому моделированию в результате построения принципиальной схемы, которая идентифицирует метод и средство голографического растривания. Для расчёта параметров голограммы создана графовая модель регистратора и решена задача построения различных расчётных подмоделей.

В итоге в рамках двух разделов модельного синтеза спроектирован, изготовлен и исследован макетный образец голографического регистратора «СДВИГ», который предназначен для получения введённой автором голограммы растриванного изображения равномерно движущихся амплитудных транспарантов на синхронно перемещающийся фототермопластический носитель. Регистратор, изготовленный на начальной стадии разработки методологии модельного синтеза оптико- и лазерно-электронных систем, обладал уникальными на время создания характеристиками по частотному разрешению. При максимальной пространственной частоте на входном амплитудном транспаранте, равной 10 мм^{-1} , и пространственной частоте фазовой решетки, используемой при получении голограммы, равной 100 мм^{-1} , несущая пространственная частота растриванного изображения составляла 20 мм^{-1} . Это позволило эффективно записать амплитудную информацию в рабочем диапазоне частот термопластика, равном $20 \text{ мм}^{-1} \pm 10 \text{ мм}^{-1}$.

Принцип действия регистратора состоит в формировании мультиплицированного пространственно-частотного спектра амплитудного коэффициента пропускания транспаранта в виде набора дифракционных порядков в задней фокальной плоскости фурие-преобразующего объектива. Транспарант и фазовая *cos-решётка* располагаются после объектива, а пространственно-частотный фильтр находится в частотной плоскости, совпадающей с входным зрачком первого проекционного объектива. Растриванное изображение формируют два отфильтрованных ± 1 -ых дифракционных порядка в плоскости изображения второго проекционного объектива. Метод получения голограммы растриванного изображения защищён двумя АС на способ, а сам регистратор внедрён в НПО "Геофизика".

В восьмой главе разработана инженерно-графовая методика модельного синтеза дифракционной лазерно-электронной системы 8 измерения диаметра оптического волокна. Показано, что особенностью модельного синтеза системы 8 является использование созданной в главе 5 системы графовых модельных окон для решения задачи модельного синтеза дифракционной лазерно-электронной системы измерения толщины линз большого диаметра как маршрутной модельной карты, задающей алгоритм проектирования. Это позволило существенно сократить время разработки волоконно-оптических оптодиаметромеров.

В результате согласования симметрий контролируемого волокна и оптической фурие-преобразующей системы построены структурно оптимальные типовые сигналы для дифракционного контроля диаметра оптического волокна. Предложены оригинальные функциональные схемы ранее не существовавших оптодиаметромеров для формирования этих типовых сигналов: когерентно-оптического измерителя диаметра волокна «КОИД-1» на основе газового лазера (измеряемый диаметр $10...50 \text{ мкм}$) и измерителя диаметра оптического во-

ложка «ИДОВ» на основе полупроводникового лазера (измеряемый диаметр 50...200 мкм).

Входной типовой фурье-сигнал имеет вид амплитудного коэффициента пропускания волокна, плоскостная симметрия которого согласована с симметрией фурье-преобразующего объектива. Найдено, что в силу плоскостной симметрии типового фурье-сигнала описание процесса преобразования сигналов в рамках внешней структурной модели сводится к трансформации плоской волны в одномерное распределение интенсивности в выходном модельном пространственно-частотном спектре.

На основе визуального подхода к математическому моделированию волоконно-оптического оптодиаметромера с помощью бинарной парадигмы геометрических моделей дискового модулятора и секторной диафрагмы построен связный оргграф внутренней структурной модели, идентифицирующий поведение сигналов в рамках оптодиаметромера и состоящий из 12-ти подмоделей поведения. В результате "графовой сборки" синтезирована двумерная алгоритмическая модель системы 8, которая включена в банк ММ структурной теории. С помощью построенной модели рассчитан измерительный пространственно-частотный спектр и построен банк теоретических графиков, используемых при обработке экспериментальных данных.

В итоге в рамках двух разделов модельного синтеза спроектированы, изготовлены и исследованы два макетных образца дифракционных лазерно-электронных оптодиаметромеров с уникальными на время создания характеристиками. Они предназначены для бесконтактного контроля диаметра волокна в процессе вытяжки дифракционным методом в диапазонах: 10...50 мкм с погрешностью $\pm 0,5$ мкм [$(5 \div 1)\%$] в случае «КОИД-1» и 50...200 мкм с погрешностью ± 2 мкм [$(4 \div 1)\%$] в случае «ИДОВ».

Принцип действия оптодиаметромеров состоит в формировании преобразованного типового фурье-сигнала в задней фокальной плоскости фурье-преобразующего объектива в виде модельного пространственно-частотного спектра в результате оптического фурье-преобразования волны, дифрагировавшей на оптическом волокне. Для «КОИД-1» измерение диаметра волокна проводится в полуавтоматическом режиме косвенным методом путём определения смещения максимума первого дифракционного порядка в спектре контролируемого волокна относительно эталонного на основе частотно-временной модуляции с помощью дискового модулятора. В результате измерения временной частоты первой гармоники периодического электрического сигнала с максимальной амплитудой и последующего сравнения измеренной частоты с частотой, соответствующей эталонному волокну, формируется сигнал, несущий информацию о диаметре волокна. В случае «ИДОВ» абсолютным методом измеряют расстояние между соседними, левым и правым, минимумами дифракционных порядков. Оптодиаметромеры защищены АС и внедрены на приборостроительном предприятии "ЛЗОС".

3. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате детального анализа сложившихся подходов к проектированию оптико-электронных приборов и обобщения практического опыта их изготовления, наладки и эксплуатации на основе трудов отечественных и зарубежных авторов, а также теоретических и экспериментальных исследований, проведённых в диссертации, решена актуальная научная проблема в области оптико-электронного приборо-

строения, имеющая важное народнохозяйственное значение, которая представляет собой крупное научно-техническое достижение и является существенным шагом в создании научных основ современного оптико-электронного приборостроения.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. На основе системотехники оптического приборостроения и классического системного анализа разработаны структурная теория и методика математического моделирования оптико- и лазерно-электронных систем, позволяющие с единых методологических позиций упорядочить, формализовать и автоматизировать этапы проектирования, изготовления и экспериментального исследования оптико-электронных приборов.

2. Основные научные положения разработанной структурной теории опираются на общие принципы структурной и поведенческой связности сигналов и преобразующих элементов и составляют теоретическую базу системно-модельного подхода к описанию процессов преобразования сигналов в оптико-электронных приборах и комплексах.

3. Для решения прикладных задач оптико-электронного приборостроения построена графовая метамодель системы предметных и теоретических моделей оптико- и лазерно-электронной системы, в рамках которой образована графовая модельная оболочка, состоящая из 292-х моделей (как известных, так и новых созданных автором и ранее не попадавших в поле зрения разработчиков).

4. С целью разработки основ научного подхода к математическому моделированию оптико- и лазерно-электронных систем построена структурно-поведенческая ММ этой системы, содержащая основные множества, отношения и отображения. В рамках этой ММ сформировано современное глубинное понимание того, что значит взять реальный оптико-электронный прибор в "абстрактные математические руки". Построены ММ разной сложности шести лазерно-электронных приборов.

5. Для обоснования научных принципов классификации оптико-электронных приборов разработана графовая модель ветвления оптико- и лазерно-электронной системы, предложен универсальный алгоритм классифицирования изделий оптического производства и построено дискретное трёхмерное классификационное пространство из "приборных" классификационных ячеек.

6. Найдено, что структурирование и типизация сигналов в оптико-электронных приборах адекватно описываются на языке теории групп. Введено понятие типа сигналов, задающего структурный критерий качества процесса преобразования сигналов в оптико-электронных приборах в виде соединения сигнального, операторно-поведенческого и преобразованного подтипов. Разработан подход к анализу и синтезу оптико- и лазерно-электронных систем, называемый методом типовых сигналов, симметрия которых согласована (совпадает) с симметрией преобразующего элемента или всей системы. С помощью этого метода в результате согласования пространственно-временных симметрий сигнального и преобразованного подтипов, элементов и системы построены структурно оптимальные типовые сигналы и разработаны классификационные категории сигналов в оптико-электронных приборах.

7. С целью проектирования, изготовления и экспериментального исследования оптико-электронных приборов на языке модельных представлений на основе по-

следовательно-параллельных графовых модельных переходов внутри графовой метамодели построена девятиэтапная инженерно-графовая методика модельного синтеза оптико- и лазерно-электронной системы. Она является математическим прообразом одной из перспективных технологических инноваций XXI века – интегрированного производства и даёт возможность: 1) в наглядном виде представить варианты маршрутов моделирования от концептуального модельного замысла до сборки и экспериментального исследования готового изделия; 2) эффективно и оптимально увязать цели модельного синтеза; 3) выделить и объяснить прежде скрытые закономерности разработки прибора; 4) включить в себя все подметодики расчёта системы как графовые модельные слои; 5) создать банк инженерных реализаций графовых метамodelей, что позволит автоматизировать процесс разработки прибора; 6) воспользоваться созданной ранее графовой метамodelью для уже решённой задачи и тем самым сократить время разработки прибора.

8. Работоспособность созданной структурной теории и эффективность системно-модельного подхода продемонстрированы при разработке автором новых перспективных оптико-электронных приборов: двух фурие-толщиномеров, фурие-стенда, голографического регистратора и двух лазерно-электронных оптодиаметромеров.

9. Результаты диссертации использованы в учебных курсах, читаемых автором в МГТУ им. Н.Э.Баумана, и отражены в учебнике для ВУЗов, монографии, двух ГОСТах, 10 авторских свидетельствах и патенте на изобретение.

4. СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Мосягин Г.М., Немтинов В.Б. Преобразование сигналов в оптико-электронных приборах систем управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1980. – 176с.

2. Мосягин Г.М., Немтинов В.Б., Лебедев Е.Н. Теория оптико-электронных систем // Учебник для студентов вузов по оптической специальности. – М.: Машиностроение, 1990. – 432с.

3. Немтинов В.Б. Групповые свойства голограмм // Материалы VII Вс. школы по голографии. – Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1975. – С. 102-117.

4. Немтинов В.Б. Групповая структура голографического процесса // Материалы VIII Вс. школы по голографии. – Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1976. – С. 57-86.

5. Немтинов В.Б. Голограммная визуалография // Труды МВТУ. – 1976. – №219, вып.9. – Оптико-электронные приборы / Под ред. Л.П.Лазарева. – С. 26-32.

6. Немтинов В.Б. Групповая классификация голограмм // Труды МВТУ. – 1976. – №219, вып.9. – Оптико-электронные приборы / Под ред. Л.П.Лазарева. – С. 33-42.

7. Немтинов В.Б. Теоретико-групповая модель голографического процесса // Материалы IX Вс. школы по голографии. – Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1977. – С. 52-83.

8. Немтинов В.Б. Структурная теория голографического процесса // Труды МВТУ. – 1979. – №309 – Расчёт и проектирование ОЭП / Под ред. Л.П.Лазарева. – С. 14-28.

9. Немтинов В.Б. Структура и качество голографического процесса // Голография и оптическая обработка информации: методы и аппаратура. – Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1980. – С. 65-71. (Материалы XII Вс. школы по голографии).

10. Немтинов В.Б. Оптико-голографические преобразующие структуры // Применение методов оптической обработки информации / Материалы III Вс. школы по оптическим методам обработки информации. – Л.: ФТИ АН СССР, 1980. – С. 42-57.

11. Немтинов В.Б. Структурные методы в оптической обработке информации // Применение методов оптической обработки изображения / Под ред. С.Б.Гуревича. – Л.: ФТИ АН СССР, 1985. – С. 46-51.
12. Немтинов В.Б. Математическое моделирование оптико-электронных систем // Труды МВТУ. – 1989. – №519 – Оптико-электронные приборы / Под ред. Л.П.Лазарева. – С. 3-19.
13. Немтинов В.Б. Модельное представление лазерных систем: лазерные системы и структурные модели // Радиоэлектронные и лазерные приборы / Под ред. И.Б.Фёдорова. – М.: Мир, 1990. – С. 26-42.
14. Немтинов В.Б. Графовая модель оптико-электронной системы // Изв. вузов. Приборостроение. – 1991. – №5, т.34. – С. 60-68.
15. Немтинов В.Б. Структурная теория оптико и лазерно-электронных систем. Ч.1. Модельное представление системы // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1993. – №1. – С. 58-73.
16. Немтинов В.Б. Структурная теория оптико и лазерно-электронных систем. Ч.2. Предметные модели // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1993. – №2. – С. 99-110.
17. Немтинов В.Б. Структурная теория оптико и лазерно-электронных систем. Ч.3. Концептуально-знаковые модели // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1994. – №2. – С. 62-72.
18. Немтинов В.Б. Структурная теория оптико и лазерно-электронных систем. Ч.4. Парадигма структурных схем // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1994. – №3. – С. 31-43.
19. Немтинов В.Б. Структурная теория оптико и лазерно-электронных систем. Ч.5. Математическое моделирование системы // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1995. – №3. – С. 17-27.
20. Немтинов В.Б. Структурная теория оптико и лазерно-электронных систем. Ч.6. Основные, типовые и базовые структурно-поведенческие математические модели // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1996. – №3. – С. 9-28.
21. Немтинов В.Б. Структурная теория оптико и лазерно-электронных систем. Ч.7. Операторное представление процесса преобразования сигналов // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1997. – №3. – С. 27-36.
22. Немтинов В.Б. Модельные представления голографической системы. // Труды XXV Школы-симпозиума по когерентной оптике и голографии. – Ярославль, 1997. – С. 44-61.
23. Немтинов В.Б. Факторизованная групповая структурная модель процесса преобразования сигналов / Структурная теория оптико и лазерно-электронных систем. Ч.8 // Вестник МГТУ. Естественные науки. – 1998. – №1. – С. 58-65.
24. Немтинов В.Б. Структурная теория оптико и лазерно-электронных систем. Ч.9. Классификационные фактор-категории оптических сигналов // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1998. – №3. – С. 39-54.
25. Немтинов В.Б. Структурная теория оптико и лазерно-электронных систем. Ч.10 Проблемы структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1998. Спец. выпуск "Лазерные и оптико-электронные приборы и системы". – С. 30-43.
26. Немтинов В.Б. Структурная теория оптико и лазерно-электронных систем. Модельный синтез системы // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1999. – №3. – С. 22-40.
27. Nemtinov V.B. Model categorization philosophy // Topics in radioelectronic and laser system design / I.Fedorov, Editor. – Boca Raton (USA): CRC Press, 1992. – P. 22-33.
28. Nemtinov V.B. Model synthesis of optical and laser-electronic systems / Vladimir G. Inozemtsev, Victor A. Shilin, Editors // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol.4761. – P. 161-169. (Second Conference on Photonics for Transportation).

29. Немтинов В.Б., Босов Д.Б., Епифанов А.С., Сериков В.Ю. Двумерная алгоритмическая модель поведения дифракционной лазерной системы измерения толщины линз // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1992. – №2. – С. 62-78.

30. Немтинов В.Б., Волосатова Т.М. Качество оптических фурье-преобразующих структур // Оптико-электронные методы обработки изображений / Под ред. С.Б.Гуревича, Г.А.Гаврилова. – Л.: Наука, 1982. – С. 190-202.

31. Немтинов В.Б., Животовский И.В. Концептуально-знаковый и структурный модельный синтез лазерно-электронного фурье-оптодиаметра // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2000. – №3(40). – С. 43-62.

32. Немтинов В.Б., Животовский И.В. Модельный синтез дифракционной лазерно-электронной системы измерения диаметра оптического волокна. Поведенческий модельный синтез лазерно-электронного фурье-оптодиаметра // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2001. – №4(45). – С. 33-50.

33. Немтинов В.Б., Щегольков С.А. Концептуально-знаковый схемный модельный синтез лазерно-электронного фурье-резьбомера // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2002. – №2(47). – С. 63-78.

34. Альянова М.С., Немтинов В.Б. Графовая классификация предметно-физических моделей оптико- и лазерно-электронных систем // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2004. – №2(55). – С. 18-26.

35. Немтинов В.Б., Щегольков С.А. Схемный модельный синтез лазерно-электронной системы подводного видения / Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2004. – №3(48). – С. 28-41.

36. ГОСТ 24865.1-81. Голोगрафия и голографические методы контроля качества. Термины и определения / Л.Д.Бахрах, З.С.Бойцова, В.Б.Немтинов, Б.М. Степанов и др. – М., 1982. – 40с.

37. ГОСТ 24865.001-82. Голोगрафия и голографические методы контроля качества. Основные положения / Л.Д.Бахрах, З.С.Бойцова, В.Б.Немтинов, Б.М. Степанов и др. – М., 1983. – 6с.

38. А.С. 678972 (СССР). Способ визуализации фазовооптической записи / В.Б. Немтинов, С.Б.Одинокоев // Б.И. – 1979. – №6.

39. А.С. 749243 (СССР). Способ получения фазового голограммного транспаранта / В.Б. Немтинов, С.Г.Аликов, Л.П.Лазарев, С.Б.Одинокоев // Б.И. – 1980. – №7.

40. А.С. 1000818 (СССР). Способ контроля качества объективов / В.Б.Немтинов, Т.М.Волосатова, И.Н.Спиридонов // Б.И. – 1983. – №8.

41. А.С. 1062731 (СССР). Устройство контроля объективов / В.Б.Немтинов, Т.М.Волосатова, И.Н.Спиридонов, М.И.Максин // Б.И. – 1983. – №47.

42. А.С. 1235373 (СССР). Устройство для контроля объективов / В.Б.Немтинов, Т.М.Волосатова, М.Т.Краюшкин, М.И.Максин, В.П.Минина, И.Н.Спиридонов, А.В.Уваров // Б.И. – 1986. – №17.

43. А.С. №1310628 (СССР). Устройство для измерения геометрических размеров объекта / В.Б.Немтинов, О.Д.Богатырев, Ю.А.Близнюк, В.В. Вячин, С.К.Штандель // Б.И. – 1987. – №18.

44. А.С. 1388708 (СССР). Способ измерения геометрических размеров объекта и устройство для его осуществления / Немтинов В.Б., Бушмакин А.Д., Минин М.К., Минина В.П., Уваров А.В. // Б.И. – 1988. – №14.

45. А.С. №1569640 (СССР). Способ контроля формы оптических элементов и устройство для их осуществления / В.Б.Немтинов, Ю.А.Близнюк, Л.С.Штандель, Н.Б.Щерба // Б.И. – 1990. – №21.

46. А.С. 1071076 (СССР). Устройство для контроля диаметров световодов / В.Б.Немтинов, Л.П.Лазарев, С.Д.Мировицкая, А.Н.Сарвин // Б.И. – 1983. – №14.

47. А.С. 1226043 (СССР). Устройство для измерения диаметра волокна / В.Б.Немтинов, О.Д.Богатырев, А.Г.Борзов, А.В.Гончаров // Б.И. – 1986. – №15.

У1698521
Немтинов В.Б.
Структурная теория и
математическое
моделирование оптики

41698521

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Подписано к печати 26.11.04г.

Заказ № 272, объём 2,0 п.л. Тираж 150 экз.

Типография МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Адрес: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5