

1547268

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

БЕРЕЗКИН ДМИТРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

05.13.05. ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

05.03.07. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научные руководители: доктор технических наук,
профессор Григорьянц А.Г.,
кандидат технических наук,
доцент Сюзев В.В.

Москва - 1995

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана.

Научные руководители - доктор технических наук,
профессор Григорьянц А.Г.;

кандидат технических наук,
доцент Сюзев В.В.

Официальные оппоненты- доктор технических наук,
профессор Горячев А.В.;

кандидат технических наук,
с.н.с. Сас А.В.

Ведущая организация - НИЦТЛ РАН г. Шатура

Защита состоится " 15 " июня 1995 г. в ____ часов на заседании специализированного совета К.053.15.04 "Вычислительная и информационная техника" в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией
Н.Э.Баумана.

Ваши отзывы
сим высылать по

Автореферат

Ученый секр
специализи
совета, к.

Подписано

1547268

Р.

ир. 100.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из важнейших преимуществ лазерного излучения (ЛИ) как инструмента обработки является возможность варьирования его параметрами в широких пределах, что определяет высокую гибкость лазерной технологии. Достижение гибкости технологических процессов, высоких характеристик качества полученных изделий невозможно без создания совершенных систем управления (СУ). С их помощью можно реализовать такие преимущества лазерной технологии как высокая скорость обработки, локальность и точность воздействия луча на изделие, прецизионность шва, реза и т.д. при обеспечении безаварийности работы, малых затратах на подготовку производства, низкой доли ручного труда и высокой культуры производства.

Цель работы. Целью работы является разработка теоретических принципов и инженерной методики построения информационно-вычислительных систем управления пространственно-временными и энергетическими характеристиками лазерных технологических комплексов, обеспечивающих повышение эффективности и качества технологических процессов.

Методы исследования. В работе использовались теоретико-множественное представление моделей объектов управления (ОУ), сигналов, законов управления, критериев качества СУ, методы теории идентификации и синтеза оптимальных СУ, принципы композиции и декомпозиции, метод численного решения уравнения теплопроводности, эффективные методы решения систем линейных алгебраических уравнений (ЛАУ) и систолизации разработанных алгоритмов, методы компьютерной графики, методы теории ЦОС, методы компьютерной томографии, алгоритмы численного решения перераспределенных систем линейных уравнений.

Научная новизна. В работе были получены следующие основные оригинальные результаты:

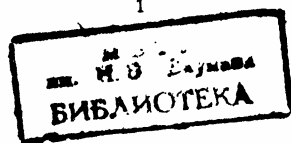
- предложен новый подход к проектированию СУ ЛТК, основанный на теоретико-множественном представлении объектов, моделей, сигналов и управляющих воздействий, что позволило разработать структуру информационно-вычислительной СУ ЛТК.
- предложена оригинальная структура СУ технологическим процессом ГЛР А1 и его сплавов и для ее реализации разработана специализированная информационно-вычислительная СУ пространственно-временными и энергетическими характеристиками ЛИ.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1547268

Березкин Д.В. Информацион-



Основной задачей, решаемой при проектировании системы, является повышение ее вычислительной эффективности, что достигается путем построения однородной вычислительной среды и отображением алгоритмов работы системы на систолическую архитектуру.

- разработана модель процессов взаимодействия лазерного излучения с поверхностью изменяющейся геометрии, отличающаяся от известных учетом распределений интенсивности и поляризации ЛИ в пространстве и во времени при наличии переотражений, что позволило использовать ее в качестве эталонной модели для управления ЛТК.

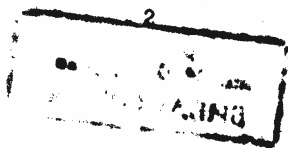
- сформулированы требования и предложена структура графического интерфейса оператора ЛТК. Предложены оригинальные алгоритмы компьютерной графики, отличающиеся возможностью произвольного проецирования 3-х мерных перекрывающихся поверхностей с высокой эффективностью анализа изображений при удалении невидимых линий.

- предложены и исследованы новые реконструктивные алгоритмы восстановления распределения интенсивности ЛИ по интегральным проекциям с учетом особенностей измеряемого оптического сигнала и характеристик шумов в системе измерения. Предложена оригинальная методика расчета точностных характеристик цифровых фильтров. Разработана и получила промышленное внедрение инженерная методика измерения распределения интенсивности ЛИ.

- для твердотельного технологического лазера с параллельным расположением активных элементов предложен способ управления, заключающийся в выработке управляющих воздействий на лампы накачки путем составления и решения нормальных уравнений Гаусса, получены и исследованы алгоритмы управления параметрами импульсов ЛИ, разработана структура специализированного микроконтроллера.

Практическая ценность. Данная в работе общая математическая постановка задачи разработки СУ ЛТК, основанная на теоретико-множественном представлении СУ, позволяет формализовать процедуру ее разработки и использовать методы системного проектирования, что приводит к существенному сокращению сроков проектирования, позволяет применять более эффективные схемотехнические решения и методы обработки информации.

Предложенная в работе СУ технологическим процессом ГЛР А1



и его сплавов позволяет улучшить основные характеристики качества процесса. Разработанные принципы построения адаптивных СУ с ОС могут быть использованы для построения СУ сложными технологическими процессами лазерной обработки и при моделировании технологических процессов.

Разработанная инженерная методика измерения распределения интенсивности ЛИ позволяет автоматизировать процесс юстировки ОКГ, производить динамический контроль параметров ЛТК и использовать результаты измерений для управления технологическими процессами лазерной обработки. Полученные оценки точностных параметров системы измерения существенно превосходят точностные параметры известных измерительных систем.

Предложенный для твердотельного технологического лазера с параллельным расположением активных элементов способ управления источником питания (ИП) позволяет реализовать управление пространственно-временными и энергетическими параметрами импульсов ЛИ. Выполнена техническая реализация структуры подсистемы управления мощностью твердотельного лазера.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы приняты к внедрению:

- в Центральном НИИ машиностроения, где будут использоваться при разработке перспективных технологий создания математического обеспечения встроенных ЭВМ и определения облика перспективных вычислительных систем для изделий РКТ;

- в Российском НИИ космического приборостроения, что позволит увеличить точность выходных характеристик специализированной лазерной системы; предложенные схемотехнические и алгоритмические решения будут использованы при разработке цифровой вычислительной системы траекторных измерений;

- на Московском аэрогеодезическом предприятии, где будут использованы при разработке систем управления антенными решетками;

- в Московском инженерном центре по лазерной технологии Российской Академии наук, что позволит обеспечить точную юстировку технологических СО₂-лазеров мощностью 1-2,5 кВт.

Внедрение подтверждается соответствующими актами.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на Международной молодежной научно-технической конференции "Актуальные проблемы информатики, управления, радиоэлектроники и лазерной техники", г. Пушкино Московской области (ноябрь, 1989г.), на Второй Всесоюзной конференции молодых ученых и специалистов

с международным участием, г. Минск (октябрь, 1990 г.), и на научно-практическом семинаре кафедры МТ-12 МГТУ им. Н.Э. Баумана (июнь, 1993 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 3 научные статьи, 1 научно-технический отчет, сделано 3 доклада на научно-технических конференциях.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и содержит: основного текста 243 стр., 66 рисунков на 53 стр., 2 таблицы. Список литературы на 14 стр. содержит 182 наименования.

Научные консультанты: К.т.н., доцент кафедры "Электронные вычислительные машины и системы" МГТУ им. Н.Э. Баумана Андреев А.М., к.т.н., доцент кафедры "Оборудование и технологии лазерной обработки материалов" МГТУ им. Н.Э. Баумана Майоров Л.Н.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, показываются основные предпосылки для выполнения работы, формулируется цель, рассматриваются основные задачи и методы исследования.

В первой главе для выработки подходов решения задачи разработки СУ процесс лазерной обработки представляется схематично, при этом за показатель качества технологического процесса, а, следовательно, и СУ, принимается вектор параметров изделия

$\rightarrow$
 U_2 и (или) некоторый многоцелевой критерий I , связывающий выходные параметры изделия и ряд других параметров, (например, экономических показателей). Сам лазерный технологический комп-

$\rightarrow$
лекс характеризуется вектором управляющих параметров U , внут-

$\rightarrow$
ренних состояний X_1 и выходных параметров V_1 . Его выходные па-

$\rightarrow$
раметры связаны с параметрами изделия U_2 через технологический

$\rightarrow$
процесс, характеризуемый вектором состояния X_2 , описываемый в общем случае сложной системой дифференциальных уравнений. Кро-

$\rightarrow$
ме того, на ЛТК действует вектор E_1 , а на технологический

процесс - вектор E_2 различных шумов, приводящих к флуктуациям параметров оборудования и параметров протекания процесса взаимодействия ЛИ с веществом. Следовательно, задача синтеза СУ не может быть сведена к задаче непосредственного определения век-

тора U по заданному критерию I с учетом ограничений, без предварительного исследования и разработки адекватной модели взаимодействия ЛИ с веществом, а также без создания системы изме-

рения параметров ЛИ Y_1 в условиях действия реальных шумов. Важной также является задача выработки управляющего воздейс-

твия U для получения заданного вектора Y_1 выходных параметров ЛТК, что приводит к необходимости моделирования отдельных его элементов.

Так как с точки зрения разработки СУ твердотельный лазер, использующий в качестве активного элемента иттрийалюминиевый гранат с Nd, отличается от CO_2 лазера, необходим анализ его отдельных элементов. Основными элементами такого лазера является оптический квантовый генератор (ОКГ), состоящий из одного (или нескольких) активных элементов (А), отражателя (О), одной (или нескольких) лампы накачки (Л), резонатора (Р) и управляющего элемента (УЭ), с помощью которого осуществляется модуляция ЛИ. Излучение передается к изделию с помощью подсистемы транспортировки ЛИ и фокусируется через оптическую систему (ОС). Напряжение на лампы накачки подается с ИП. В общем случае зависимость напряжения и тока на выходе ИП являются функциями времени $U(t)$ и $I(t)$, конкретный вид которых определяется технологическими требованиями к ЛИ, характеристиками ламп накачки и выбранной оптической схемой ОКГ.

В работе рассмотрен каждый из элементов ЛТК с точки зрения установления особенностей управления им при помощи СУ ЛТК, что позволило разработать структуру СУ. Основными особенностями СУ являются: иерархичность, наличие человека-оператора в контуре управления, наличие развитой подсистемы диагностики, возможность работы СУ ЛТК в составе гибких производственных систем (ГПС).

Разработка алгоритмов и критериев работы СУ, детализация функций отдельных подсистем и разработка алгоритмов их взаимодействия требуют формального математического описания СУ

ЛТК. Для этого в работе используются методы теории систем и современный математический аппарат теоретико-множественного описания СУ, развитый в работах Заде, Белмана, Фалба, Арбиба, Портера и др.

Применение этих методов позволило формализовать задачу проектирования СУ ЛТК и свести ее к задаче синтеза системы оптимального адаптивного управления в виде трехуровневой системы с подсистемами:

- оптимального управления объектом реального времени;
- идентификации отображения вход-выход объекта;
- идентификации сигналов объекта.

Таким образом, система большой размерности с помощью метода декомпозиции представлена сложной сетью прямых и обратных связей более простых подсистем, поддающихся строгой формализации.

Конкретный вид описанных объектов СУ ЛТК и связей между ними определяется спецификой решения задач управления и устанавливается в соответствующих разделах диссертации.

Для конкретизации критериев качества СУ выбран технологический процесс ГЛР тонколистового алюминия и его сплавов. Для выявления наиболее существенных параметров лазерного технологического оборудования, влияющих на качество изделий, получаемых в процессе ГЛР алюминия и его сплавов и установления качественных зависимостей между этими параметрами и характеристиками качества проведен анализ теоретических и экспериментальных работ, посвященных анализу этого технологического процесса, который показал, что параметры ЛТК, определяющие параметры импульсов импульсного ЛИ и параметры распределения энергии ЛИ в пространстве являются наиболее важными с точки зрения достижения высокого качества ГЛР А1 и его сплавов, что требует разработки соответствующих подсистем управления и алгоритмов их функционирования.

Во второй главе проведен анализ работ в области моделирования теплофизических процессов в материале, протекающих под действием ЛИ, который показал, что, во-первых, применительно к задачам моделирования ГЛР алюминия и его сплавов следует отдать предпочтение модели, основанной на решении задачи теплопроводности с соответствующими граничными условиями, во-вторых, при моделировании необходимо учитывать распределение плотности энергии ЛИ в пространстве и во времени и, в-третьих, использовать метод конечных элементов (МКЭ) для эффективного числен-

ного решения дифференциального уравнения теплопроводности.

Для исследования влияния различных факторов на качество ГЛР алюминиевых сплавов разработана физическая модель процесса.

Была разработана математическая модель процесса, при построении которой сделаны следующие допущения:

1) Геометрия реза определяется как совокупность точек, имеющих температуры выноса металла при том или ином механизме взаимодействия излучения с веществом; этот механизм определяется из полученных теоретически оценок плотности мощности излучения как функции от температуры;

2) Принимаются допущения геометрической оптики;

3) Массопереносом в удаляемом металле пренебрегают.

С учетом сделанных допущений решается методом конечных элементов уравнение теплопроводности вида:

$$\lambda_{xx} \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \lambda_{yy} \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \lambda_{zz} \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} + Q - C\gamma \frac{\delta T}{\delta t} = 0, \quad (1)$$

с соответствующими граничными условиями; где

T - поле температур;

$C\gamma$ - объемная теплоемкость;

$\lambda_{xx}, \lambda_{yy}, \lambda_{zz}$ - коэффициенты теплопроводности по осям x, y и z , соответственно;

Q - мощность внутренних источников;

t - время.

Для интегрирования выражения (1) составляется функционал определенного вида, который минимизируется. При этом интеграл по объему тела, входящий в выражение функционала разбивается на интегралы по конечным элементам, температура в каждой точке которых может быть найдена по известным значениям в узлах, и минимизируя функционал по узловым значениям температуры $\{T\}$, получаем систему дифференциальных уравнений первого порядка:

$$[C] \frac{dT}{dt} + [K]\{T\} = \{F\}, \quad (2)$$

где $\{T\}$ - вектор узловых значений температур;

$[C]$ - матрица демпфирования;

$[K]$ - матрица жесткости;

$\{F\}$ - вектор нагрузки;

Проведенный анализ методов решения системы дифференциальных уравнений (2) показал преимущество метода Галеркина. Для

решения системы (2) по методу Галеркина вводится линейный конечный элемент вдоль временной оси.

Такой подход к решению уравнения (1) реализован в разработанном на кафедре МТ-12 МГТУ им. М.Э. Баумана программном комплексе, где при расчетах учитываются зависимости от температуры основных теплофизических параметров, однако предполагается, что геометрия тел остается стационарной. В то же время в процессе резки форма области взаимодействия излучения с материалом постоянно меняется и оценить качество получаемых изделий возможно только при учете всех этих изменений в процессе обработки. При уносе части материала из зоны обработки происходит изменение геометрии поглощающей поверхности, что приводит к изменению теплового потока. Кроме того изменения теплового потока вызываются неравномерностью пространственного распределения плотности мощности в лазерном луче, а при достаточно больших глубинах паро-газового канала и переотражениями излучения от его стенок. Учет этих факторов необходим для более точного определения глубины и качества реза.

Учет неравномерности теплового потока в зоне лазерной обработки приводит к необходимости доработать существующий программный комплекс. В связи с этим, для описания процесса взаимодействия ЛИ с веществом апертура лазерного луча разбивается на совокупность $n \times n$ лучей и далее прослеживается прохождение каждого из них.

В начале моделирования тепловых процессов задаются начальные условия: исходная разбивка, параметры излучения параметры материала. Затем рассчитывается взаимодействие каждого из исходных лучей с поверхностью материала с учетом переотражений, в результате чего определяются тепловые источники на поверхности. Происходит расчет изотерм при помощи разработанных ранее программ. Определяется положение границы раздела фаз по критерию:

$$T > T^*, \quad (3)$$

где $T_{пл} < T^* < T_k$.

$T_{пл}$ - температура плавления; T_k - температура кипения.

Температура T^* является варьируемым параметром модели и выбирается своей для каждого конечного элемента границы в зависимости от плотности мощности на j -м конечном элементе границы.

После чего осуществляется пересчет сетки конечных элементов и вновь рассчитывается взаимодействие излучения с поверх-

ностью, форма которой определена на предыдущем шаге решения.

Таким образом, для построения математической модели необходимо определить точки пересечения каждого из элементарных лучей с конечными элементами поверхности и если они пересекаются, определить угол падения луча в этой точке, а также уравнение отраженного луча.

Элементарные лучи описываются параметрическими уравнениями прямой, а исходная поверхность для линейного четырехугольного элемента представляется совокупностью конечных элементов, причем в каждом из них глобальные координаты выражаются через местные координаты ξ, η в виде:

$$\begin{cases} X = a_x \xi + b_x \xi \eta + c_x \eta + d_x \\ Y = a_y \xi + b_y \xi \eta + c_y \eta + d_y \\ Z = a_z \xi + b_z \xi \eta + c_z \eta + d_z \end{cases} \quad (4)$$

где коэффициенты $a_x, a_y, \dots, c_y, c_z$ определяются через глобальные координаты и решается задача пересечения луча с поверхностью.

После ряда преобразований получается уравнение:

$$p_1 t^2 + p_2 t + p_3 = 0, \quad (5)$$

где p_1, p_2, p_3 выражаются через глобальные координаты, из которого определяется параметр t уравнения прямой, соответствующий точке пересечения. После этого определяется точка пересечения в глобальных и местных координатах.

Местные координаты введены таким образом, чтобы в пределах данного конечного элемента выполнялись соотношения:

$$\begin{cases} -1 \leq \xi \leq 1 \\ -1 \leq \eta \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

Вычислив местные координаты точки пересечения ξ_n и η_n , подставляем их в систему (6). Если неравенства выполняются, то делаем вывод о пересечении рассматриваемого луча с рассматриваемым конечным элементом.

Используя соотношения аналитической геометрии и особенности конечноэлементной аппроксимации поверхности, в работе получены аналитические выражения для вычисления угла падения элементарного луча и направляющих отраженного луча.

Зная угол падения луча и температуру в точке падения можно определить долю поглощенной и отраженной мощности ЛИ, учитывая при этом поляризацию падающего излучения. После чего поглощенная мощность пересчитывается по узлам КЭ.

В третьей главе рассматриваются вопросы построения вычислительной модели, с помощью которой будут производиться расчеты.

Полученные в главе 2 аналитические выражения для определения координат точек пересечения луча с поверхностью, вычисления угла падения и уравнение отраженного луча, сводятся в единый алгоритм, который позволит рассчитывать тепловые источники на поверхности обрабатываемого материала с учетом временной и пространственной неоднородности потока энергии, изменений формы поверхности в процессе резки и переотражения излучения от ее стенок.

Важной особенностью разработанного алгоритма моделирования взаимодействия ЛИ с поверхностью металлов является чувствительность вычисляемых значений поглощенной энергии ЛИ в узлах к точности определения коэффициентов отражения. Для обеспечения точности разработанной модели проведено исследование зависимости коэффициентов отражения от температуры, длины волны ЛИ, направления поляризации, угла падения ЛИ для различных металлов, которое показало хорошее соответствие получаемых значений результатам экспериментов.

На основе анализа теоретических и экспериментальных работ установлено, что для достижения лучших условий взаимодействия ЛИ с металлом, имеющим высокую удельную электропроводность, а, следовательно, повышения эффективности и качества ГЛР СУ пространственно-временными и энергетическими характеристиками ЛТК должна обеспечить минимально возможные размеры области фокусировки (минимальный диаметр фокального пятна и максимальную длину зоны с высокой плотностью мощности ЛИ по толщине материала). Достижение таких условий возможно как путем оптимизации оптической системы ЛТК, так и за счет оптимального управления распределением интенсивности ЛИ и положением плоскости поляризации (при резке по сложному контуру).

Результаты проведенных численных экспериментов показывают, что предложенный алгоритм позволяет производить расчеты взаимодействия ЛИ с поверхностью сложной формы с высокой точностью. Это позволяет использовать разработанный алгоритм как для расчетов тепловых источников при лазерной обработке, так и

для расчета оптических элементов лазеров.

Разработанная вычислительная модель может быть использована в качестве эталонной в СУ технологическим процессом ГЛР, т.е. для выработки управляющих воздействий можно пользоваться моделью ОУ, которая аппроксимирует его поведение. При этом параметрами управления будут характеристики ЛИ: длина волны λ , средняя мощность P , мощность P_m , частота f_m , длительность τ_m импульсного ЛИ, характеристики распределения плотности мощности ЛИ в пространстве, направление и степень поляризации и некоторые другие, а основным выходным параметром - распространяющееся в пространстве и во времени поле температур $T(X, Y, Z, t)$. В качестве параметров ОУ будут учитываться теплофизические свойства обрабатываемого материала, имеющие различные виды нелинейностей.

Система управления, реализующая указанный подход, должна состоять из вычислительного модуля, реализующего вычислительную модель ОУ, подсистем управления ИП и фокусировкой ЛИ, вырабатывающих управляющие воздействия на отдельные узлы ЛТК, датчика характеристик факела и микропроцессорной подсистемы измерения распределения интенсивности ЛИ с соответствующим датчиком. Кроме чисто геометрических параметров датчик характеристик факела может контролировать такие параметры как его светимость, спектральный состав продуктов разрушения, что позволит исследовать протекание тонких тепло-физических и химических процессов и уточнить отдельные параметры модели. Следовательно, СУ технологическим процессом ГЛР А1 и его сплавов должна строиться по принципам оптимальной адаптивной СУ с обратной связью, в которой для выработки управляющих воздействий используется эталонная модель технологического процесса, а информация о параметрах факела, поступающая по ОС используется для настройки свободных параметров модели.

Сложность тех задач, которые должен решать вычислительный модуль, входящий в СУ технологическим процессом, большой объем обрабатываемой им информации, сложность интерфейсных связей приводят к необходимости реализовать его в виде специализированной информационно-вычислительной системы управления пространственно-временными и энергетическими характеристиками ЛТК. При этом архитектура информационно-вычислительной системы должна способствовать достижению максимальной эффективности вычислений путем широкого использования параллельных алгоритмов обработки информации.

Реализация структурного параллелизма в случае использования МКЭ при решении краевых задач математической физики и отображение на архитектуру подходящей вычислительной среды требует предварительного выделения этапов решения задачи.

Одним из преимуществ МКЭ является то, что многие его этапы являются общими независимо от областей использования метода. Были проанализированы особенности алгоритмов МКЭ с точки зрения возможности отображения их на систолическую архитектуру и установлено, что основной выигрыш по скорости вычислений может быть получен на этапе решения системы линейных алгебраических уравнений (ЛАУ). Рассмотрены прямые и итерационные алгоритмы решения системы ЛАУ, проведен анализ вычислительных затрат, необходимых для их реализации. Разработана схема отображения треугольного LU-разложения на систолическую архитектуру, выбрана функциональная схема процессорного элемента, предназначенного для использования в качестве элемента систолической матрицы, сформулированы требования к его быстродействию и разрядности.

Анализ информационных потоков в информационно-вычислительной системе и необходимость их оперативного контроля со стороны человека-оператора непосредственно в период управления технологическим процессом приводят к необходимости разработки графического интерфейса оператора ЛТК. Проведенный анализ задач, решаемых графическим интерфейсом показал, что они в основном сводятся к решению задач двумерной и трехмерной компьютерной графики; предложенные поверхностные геометрические модели трехмерных объектов, использующие конечноэлементную аппроксимацию, оказываются эффективными для решения этих задач, что позволило предложить быстрые алгоритмы удаления невидимых линий при произвольном проецировании трехмерных перекрывающихся поверхностей.

Четвертая глава посвящена созданию подсистемы измерения распределения интенсивности ЛИ. Кроме решения задач управления технологическими процессами, исследования теплофизических процессов в материале при лазерной обработке эта подсистема может быть использована как автономное устройство для юстировки оптических элементов ЛТК, диагностики лазерного оборудования, разработки новых лазеров, а также, при внесении некоторых модификаций в первичный датчик оптического сигнала, для управления различными технологическими процессами, требующими динамического контроля световых и тепловых полей.

где $b_0 = -P_1$ -мощности, формируемые каждым из кристаллов, $i = 1, \dots, 12$;

$b_j = K_{1j}$ -экспериментально определенный коэффициент, учитывающий влияние j -й лампы на i -й кристалл, $j = 1, \dots, 7$, I_j^* - искомые токи.

В системе (7) черточками над переменными показано усреднение по всем $i = 1, 2, \dots, 12$.

Проведенное имитационное моделирование позволило оценить точность разработанных алгоритмов управления, которые реализуют предложенный способ. Оно показало высокую точность управления: среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибки управления не превосходит $\sigma_p = 1,6\%$, а математическое ожидание (МО) $M_p = 2,6 \times 10^{-4}$.

Разработаны и исследованы алгоритмы управления параметрами импульсов ЛИ. Проведенное имитационное моделирование силовой части импульсно-периодического лазера позволило отработать предложенные алгоритмы и оптимизировать параметры цифровой обработки.

В результате проведенных исследований установлена необходимость включения цифрового фильтра в ОС подсистемы управления мощностью; при помощи имитационного моделирования СУ установлено, что цифровая фильтрация методом усреднения является оптимальной как для участков циклограммы с постоянной мощностью, так и для участков с постоянной скоростью ее изменения, произведена оптимизация значения апертуры фильтра, показано, что даже в случае высокой скорости изменения средней мощности абсолютная погрешность СУ не превосходит $\Delta = \pm 5\%$ при оптимальной настройке цифрового фильтра.

Проведено макетирование специализированной вычислительной подсистемы управления мощностью твердотельного лазера, выполненные вычислительные и полунатурные эксперименты подтвердили достоверность предложенных алгоритмических и схемотехнических решений.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен новый подход к проектированию СУ ЛТК, основанный на теоретико-множественном представлении объектов, моделей, сигналов и управляющих воздействий, что позволило разработать структуру информационно-вычислительной СУ ЛТК; выполнено математическое описание ее отдельных подсистем и разрабо-

таны алгоритмы управления.

2. Предложена оригинальная структура СУ технологическим процессом ГЛР А1 и его сплавов и показано, что для ее реализации необходимо разработать специализированную информационно-вычислительной СУ пространственно-временными и энергетическими характеристиками ЛИ.

Основной задачей, решаемой при проектировании системы, является повышение ее вычислительной эффективности, что достигается путем построения однородной вычислительной среды и отображением алгоритмов работы системы на систолическую архитектуру.

3. Разработана модель процессов взаимодействия лазерного излучения с поверхностью изменяющейся геометрии, отличающаяся от известных учетом распределений интенсивности и поляризации ЛИ в пространстве и во времени при наличии переотражений, что позволило использовать ее в качестве эталонной модели для управления пространственно-временными и энергетическими характеристиками ЛТК с целью достижения заданного качества технологического процесса.

4. Сформулированы требования и предложена структура графического интерфейса оператора ЛТК. Предложены оригинальные алгоритмы компьютерной графики, отличающиеся возможностью произвольного проецирования 3-х мерных перекрывающихся поверхностей с высокой эффективностью анализа изображений при удалении невидимых линий для оперативного представления точной и всеобъемлющей информации оператору ЛТК.

5. Предложены и исследованы новые реконструктивные алгоритмы восстановления распределения интенсивности ЛИ по интегральным проекциям с учетом особенностей измеряемого оптического сигнала и характеристик шумов в системе измерения. Предложена оригинальная методика расчета точностных характеристик цифровых фильтров. Разработана и получила промышленное внедрение инженерная методика измерения распределения интенсивности ЛИ.

6. Для твердотельного технологического лазера с параллельным расположением активных элементов предложен способ управления, заключающийся в выработке управляющих воздействий на лампы накачки путем составления и решения нормальных уравнений Гаусса, проведено имитационное моделирование силовой части ИП лазера, что позволило получить и исследовать алгоритмы управления параметрами импульсов ЛИ.

7. Проведено макетирование подсистем измерения и управления пространственно-временными и энергетическими характеристиками ЛТК и создано их специализированное программное обеспечение. Проведенные на макете экспериментальные исследования подтвердили соответствие теоретических результатов работы наблюдаемым в экспериментах.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Березкин Д.В. Система управления выходной мощностью многоканального твердотельного технологического лазера//Актуальные проблемы информатики, управления, радиоэлектроники и лазерной техники: Сборник тезисов докладов межвузовского отборочного тура Всесоюзной конференции НТТМ и студентов, 22-26 мая 1989 г. / МВТУ им. Н.Э. Баумана. - М., МВТУ, 1989. - с. 117-118.

2. Березкин Д.В., Сюзов В.В. Микропроцессорная система управления выходной мощностью многоканального твердотельного технологического лазера//Актуальные проблемы информатики, управления, радиоэлектроники и лазерной техники: Сборник докладов и сообщений Международной молодежной научно-технической конференции, 28 ноября - 1 декабря 1989 г. / г. Пушкино Московской области. - М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1989. - с. 84.

3. Березкин Д.В., Майоров Л.Н., Сюзов В.В. Специализированная микропроцессорная информационно-измерительная система динамического контроля распределения плотности мощности по поперечному сечению лазерного луча// Контроль, управление и автоматизация в современном производстве: Сборник докладов и сообщений Второй Всесоюзной конференции молодых ученых и специалистов с международным участием, 15-19 октября 1990 г. / г. Минск. -М.: НПО "Магистр", 1990. - с. 50-51.