

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ЭЛЕКТРОМЕТРИИ СИБИРСКОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

На правах рукописи

ГОЛОШЕВСКИЙ НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

Методы и программно-аппаратные средства управления устройствами лазерной
микрообработки с комплементарной системой позиционирования

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
Бессмельцев Виктор Павлович

Новосибирск – 2021

Список сокращений	4
Введение.....	5
Глава 1 Алгоритмы и программно-аппаратные средства управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования лазерного пучка	13
1.1 Особенности управления комплементарными системами позиционирования	13
1.2 Управление «низкоинерционным» сканером.....	21
1.3 Управление «высокоинерционным» сканером в задачах прецизионного позиционирования.....	43
1.4 Выводы по первой главе.....	47
Глава 2 Разработка методов коррекции статических искажений, вносимых компонентами оптической системы и динамических ошибок позиционирования электромеханических приводов.....	49
2.1 Метод калибровки оптического тракта комплементарных систем позиционирования для устройств микрообработки с субмикронным разрешением и микронной точностью.....	49
2.2 Алгоритм компенсации динамических ошибок позиционирования электромеханических приводов «высокоинерционного» сканера с помощью «низкоинерционного» сканера в комплементарных системах позиционирования	66
2.3 Выводы по второй главе.....	74
Глава 3 Разработка комплекса программно-аппаратных средств управления системами лазерной микрообработки с комплементарной структурой.....	76
3.1 Структура программно-аппаратных средств управления устройствами с комплементарной системой позиционирования лазерного пучка.....	76
3.2 Программные средства для встраиваемого процессора.....	80
3.3 Программные средства для ПЛИС.....	81
3.4 Аппаратные средства управления комплементарной системой позиционирования	88

3.5 Выводы по третьей главе.....	90
Глава 4 Практическое применение разработанных программно-аппаратных средств в устройствах лазерной микрообработки	92
4.1 Лазерная система микрообработки движущихся полимерных носителей	92
4.2 Устройство промышленной маркировки средств взрывания.....	99
4.3 Система микрообработки субмикронного разрешения на основе фемтосекундного лазера.....	107
4.4 Выводы по четвертой главе.	120
Заключение	122
Список цитируемой литературы.....	124

Список сокращений

CAD-модель – двумерная или трехмерная модель, создаваемая в системе автоматизированного проектирования, содержащая информацию о размерах, форме и относительном расположении объектов

САПР (CAD) – система автоматизированного проектирования (computer-aided design)

ШД – шаговый двигатель

BLDC –бесщеточный (вентильный) мотор постоянного тока (Brushless Direct Current Motor)

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема

DSP – цифровой сигнальный процессор

ALM – адаптивный логический модуль, структурная единица ПЛИС, как правило содержащая таблицу перекодировки (LUT) с оперативной памятью, триггер и логическую схему двоичного переноса.

Введение

Одной из наиболее динамично развивающихся областей применения лазерного излучения является микрообработка различных материалов [1 – 6]. Технологии лазерной микрообработки успешно применяются для изготовления микроканалов биочипов, используемых в биологических исследованиях [7, 8], создания элементов микроэлектроники [9], микромеханики и фотоники [10], защиты документов и ценных бумаг от подделки [11, 12], аддитивного синтеза [13]. Основными требованиями к обработке в подобных задачах являются микронная точность, субмикронное разрешение и высокое качество (минимизация неконтролируемого оплавления, обгорания материала, отсутствие трещин и сколов). Другим не менее важным требованием, особенно для промышленного применения, является высокая производительность обработки.

Точность и разрешение обработки зависят в основном от применяемой системы позиционирования лазерного луча и фокусирующей оптики. Требуемое качество возможно получить при соответствии типа источника лазерного излучения и параметров обработки используемому материалу и характеру желаемой модификации. Одними из основных параметров, влияющих на качество обработки, являются плотность мощности излучения и ее стабильность, которая зависит от постоянства характеристик лазера и скорости перемещения пучка [14]. Использование в высокопроизводительных системах микрообработки импульсных лазеров с частотой следования импульсов сотни килогерц и выше или непрерывных с микросекундными фронтами включения/выключения позволяет выполнять обработку со скоростями порядка метра в секунду по сложной траектории. Для перемещения лазерного пучка в таких системах в основном применяются различные виды электромеханических сканеров с датчиками обратной связи, поскольку они обеспечивают более высокое пространственное разрешение, чем системы отклонения лазерных пучков на других физических принципах, например, акусто- или электрооптические дефлекторы [15, 16].

Перемещение сфокусированного лазерного пучка со скоростью до нескольких метров в секунду и микронной точностью относительно обрабатываемого материала может осуществляться с помощью электромеханических систем позиционирования на основе шаговых или сервоприводов. Использование в такой схеме короткофокусного объектива позволяет получить световое пятно микронного диаметра, при этом размер обрабатываемых изделий определяется диапазоном перемещения приводов и может достигать нескольких квадратных метров. Однако из-за большой массы подвижных элементов системы позиционирования типичное время перемещения с микронной точностью может составлять от нескольких десятых до единиц секунд. Например, для одного из самых скоростных прецизионных сервоприводов, представленных на рынке, ABL1500-B (Aerotech, США) [17] с линейным двигателем и воздушными подшипниками максимальное ускорение составляет 20 м/с^2 , то есть время перемещения на расстояние в десятки микрон с ошибкой менее 1 мкм не может быть меньше нескольких миллисекунд (считая систему управления идеальной). Как минимум на порядок более высокое быстродействие при перемещении лазерного пучка по сложным траекториям может быть достигнуто при использовании сканирующих модулей на основе угловых гальванометрических дефлекторов с низкой инерционностью. Дефлектор такого типа состоит из электродвигателя постоянного тока с закрепленными на его оси зеркалом и датчиком положения и выполняет угловую развертку лазерного пучка [18]. Современные дефлекторы обеспечивают угол развертки до $\pm 20^\circ$, линейность преобразования управляющего воздействия в угол поворота зеркала не хуже $99,9\%$, высокое быстродействие (время перемещения на малый угол с точностью $99,9\%$ – доли миллисекунды), разрешение до $2^{18} - 2^{24}$ угловых позиций, воспроизводимость 3×10^{-6} , долговременную (8 часов) стабильность до $1,5 \times 10^{-5}$ [19, 20]. Сканирующий модуль обычно содержит два дефлектора с ортогонально расположенными осями вращения для развёртки лазерного пучка по двум координатам и объектив плоского поля для фокусировки и преобразования угловых перемещений в линейные. Получить в этом случае микронный размер сфокусированного пучка возможно

лишь при использовании объективов с рабочим отрезком не более нескольких сантиметров. Отсюда возникает существенное ограничение на максимальный размер обрабатываемого объекта, поскольку поле обработки подобных объективов не может превышать нескольких квадратных сантиметров.

Для задач микрообработки объектов больших форматов при обеспечении точности, быстродействия и скорости перемещения пучка и сохранении микронного размера пятна в плоскости обработки, например, для полупроводниковой литографии [21], возможно применение комплементарных (составных) систем позиционирования, объединяющих два различных по типу сканера с взаимодополняющими характеристиками. Один из вариантов реализации комплементарной схемы [22] предполагает использование высокоскоростного сканирующего модуля на основе гальванометрических дефлекторов для развертки лазерного пучка по сложной траектории в малом поле обработки, размер которого определяется используемым фокусирующим объективом. Обработка всей поверхности изделия достигается перемещением обрабатываемого материала и/или сканирующего модуля друг относительно друга посредством многокоординатной системы позиционирования на основе шаговых или сервоприводов, обладающей меньшим быстродействием по сравнению со сканирующим модулем.

Точность и быстродействие таких систем зависят от эффективности алгоритмов и программно-аппаратных средств управления, которые должны учитывать искажения, вносимые оптическими компонентами, динамические свойства различных по быстродействию сканеров, особенности используемых лазерных источников. Известные на момент начала работы алгоритмы, программные и аппаратные средства не позволяли полностью реализовать потенциальные преимущества комплементарной схемы.

Целью диссертационной работы является создание комплекса программно-аппаратных средств управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования лазерного пучка, позволяющих

обеспечить высокую производительность микрообработки при микронной точности и субмикронном разрешении.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. исследовать эффективность современных методов и программных средств управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования лазерного пучка;
2. разработать алгоритмы коррекции статических ошибок позиционирования лазерного пучка, связанных с конструктивными особенностями оптического тракта комплементарных систем позиционирования; программно-аппаратные средства для их калибровки;
3. разработать алгоритмы и программные средства динамической компенсации отклонений лазерного пучка от заданной траектории, связанных с переходными процессами электромеханических приводов комплементарной системы позиционирования; предложить методы ускоренной настройки системы с использованием математической модели гальванометрического дефлектора.
4. разработать программно-аппаратные средства управления устройствами микрообработки с комплементарной системой позиционирования, выполнить практическую проверку их эффективности.

Содержание диссертации изложено в четырех главах.

Первая глава, которая носит обзорный характер, содержит результаты исследования современных методов и программных средств управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования лазерного пучка. Рассмотрены точностные характеристики основных компонентов таких систем, отвечающих за позиционирование лазерного пучка, причины возникновения погрешностей и методы их коррекции. На основе литературных источников выполнен обзор существующих алгоритмов управления и подготовки исходных данных для таких систем, ограничения их точности и быстродействия, связанные со статическими искажениями, вносимыми компонентами оптической системы и динамическими ошибками позиционирования электромеханических приводов.

Во второй главе предложены методы и алгоритмы, позволяющие повысить точность и производительность устройств микрообработки с комплементарной системой позиционирования. В первом разделе главы представлен метод прецизионной калибровки оптического тракта таких устройств, основанный на двухшаговом итерационном алгоритме обработки профилометрической карты калибровочного объекта. Предложен алгоритм расчета скорректированного положения лазерного пучка методом кусочно-планарной интерполяции для компенсации статических искажений оптического тракта, ориентированный на использование во встроенных системах управления на основе микроконтроллеров или программируемых логических интегральных схем. Во втором разделе рассмотрен алгоритм динамической компенсации отклонений лазерного пучка от заданной траектории, связанных с переходными процессами электромеханических приводов комплементарной системой позиционирования. Приведены результаты настройки параметров алгоритма, выполненной с использованием математической модели гальванометрического дефлектора, и экспериментальные результаты проверки его эффективности.

Третья глава посвящена разработке программно-аппаратных средств управления устройствами микрообработки с комплементарной схемой позиционирования. Предложены структура управления, реализующая предложенные методы и алгоритмы, и вариант разделения функций между ее вычислительными элементами. Приводится описание комплекса программного обеспечения для микроконтроллеров и ПЛИС, а также аппаратных средств, разработанных на основе предложенной структуры.

В четвертой главе рассмотрены особенности применения разработанных программно-аппаратных средств в системах лазерной микрообработки исследовательского и промышленного назначения. Для каждой из систем приведены экспериментальные результаты микрообработки, демонстрирующие эффективность использования предложенных методов и алгоритмов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. В конце приводится список цитируемой литературы.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 6 печатных работах в рецензируемых научных журналах и изданиях [23-28], входящих в перечень ВАК РФ, получено 2 патента на изобретение [29, 30] и 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ [31 – 34].

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: научно-практической конференции «Оптика-XXI век», Москва, 2005 г.; «Лучевые технологии и применение лазеров», Санкт-Петербург, 2006 г.; «СибОптика», Новосибирск, 2016, 2017 г.; «Fundamentals of Laser Assisted Micro– & Nanotechnologies», Санкт-Петербург, 2007, 2010, 2016 гг.; HOLOEXPO, Нижний Новгород, 2018; «Современные проблемы информатизации», Красноярск, 2019 г.

Практическая значимость диссертации

Разработанный комплекс программных средств для ЭВМ, и программно-аппаратных модулей для специализированных контроллеров, реализованных на основе ПЛИС и встроенных микропроцессоров, позволяет проектировать и создавать высокопроизводительные системы лазерной микрообработки субмикронного разрешения, микронной точности.

Разработанный комплекс модульных программно-аппаратных средств для управления устройствами микрообработки с комплементарной системой позиционирования лазерного пучка успешно применен в устройствах:

- записи синтезированных цифровых голограмм;
- скоростной лазерной микроперфорации, предназначенном для нанесения защитных изображений на документы;

- лазерной микроперфорации непрерывно движущейся ленты, используемой для исследования особенностей технологий микроперфорации органических материалов (НИИ Гознака, г. Москва).
- промышленной лазерной маркировки средств инициирования взрывчатых веществ (ОАО «НМЗ Искра», г. Новосибирск);
- прецизионных лазерных рабочих станциях «ФПЛ» на основе фемтосекундного лазера для микрообработки заготовок из оптического стекла, созданных для АО "Новосибирский приборостроительный завод" (за разработку присуждена Государственная премия Новосибирской области) и АО «Вологодский оптико-механический завод»;

Основные положения, выносимые на защиту

- Использование кросс-корреляционного алгоритма определения координат реперных точек калибровочного объекта, с последующей коррекцией положения лазерного пучка методом кусочно-планарной интерполяции для коррекции статических искажений оптического тракта в комплементарных системах позиционирования при высокой робастности позволяет обеспечить относительную погрешность позиционирования лазерного пучка 10-5 от поля записи гальванометрического сканирующего модуля.
- Применение в комплементарных системах позиционирования метода динамической компенсации отклонений лазерного пучка от заданной траектории по сигналам от датчиков положения электромеханических приводов и данным калибровки оптического тракта, реализованного в виде программного модуля ПЛИС специализированного контроллера, позволяет существенно увеличить производительность обработки без потери точности в задачах лазерной микрообработки (микроперфорации и микрофрезерования).
- Впервые предложенные оригинальные способы фемтосекундной лазерной микрообработки стеклянных подложек, предполагающие заполнение контура формируемого микроканала растровыми линиями определенной длины,

расположенными под углом от 35° до 90° относительно его образующей, позволяют уменьшить количество дефектов при высокой производительности.

- Разработанный комплекс универсальных программных средств для ЭВМ, и программно-аппаратных модулей для специализированных контроллеров, реализованных на основе ПЛИС и встроенных процессоров, позволяет проектировать и создавать высокопроизводительные системы лазерной микрообработки субмикронного разрешения, микронной точности.

Глава 1 Алгоритмы и программно-аппаратные средства управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования лазерного пучка

В настоящей главе на основе литературных источников сделан обзор существующих методов управления и подготовки данных для устройств микрообработки с комплементарной системой позиционирования лазерного пучка. Рассмотрены характеристики их основных компонентов, определяющих точность позиционирования лазерного пучка, причины возникновения погрешностей и методы их коррекции.

1.1 Особенности управления комплементарными системами позиционирования

С момента начала применения лазеров для формообразования предложено большое число различных систем позиционирования лазерного пучка (под позиционированием понимается как растровая развертка лазерного пучка, так и его перемещение по произвольной траектории), отличающихся по физическому принципу работы, устройству, назначению, техническим характеристикам. Один из вариантов классификации систем позиционирования [16] предполагает их разделение на две категории «высокоинерционные» и «низкоинерционные». К «высокоинерционным» системам принято относить сканеры на основе вращающегося зеркального многогранника, электромеханических приводов (линейных или барабанного типа) [35], используемых для перемещения фокусирующей оптики или материала; к «низкоинерционным» – гальванометрические зеркальные сканеры, акустооптические и электрооптические дефлекторы [36]. Различие между ними связано в первую очередь с их быстродействием – то есть возможностью оперативно изменять направление движения лазерного пучка. Преимуществом «высокоинерционных» систем является способность поддерживать высокую скорость и точность прямолинейных перемещений лазерного пучка. Лазерные устройства на основе электромеханических линейных приводов кроме этого позволяют обрабатывать

изделия размером до нескольких квадратных метров. «Низкоинерционные» системы позволяют оперативно контролировать и изменять направление движения пучка, выполнять его быстрое произвольное позиционирование, но, как правило, имеют ограниченную площадь обработки [37].

Для использования положительных качеств разных по быстродействию сканеров было предложено объединять их в одну составную или комплементарную, то есть обладающую взаимодополняющими качествами, систему. Так в работах [38, 39] предложена структура комплементарных систем, сочетающая в себе основное «высокоинерционное» и дополнительное «низкоинерционное» сканирующие устройства с различными динамическими характеристиками, предназначенные для управления одним световым пучком с целью оптической коррекции погрешностей основного сканирующего устройства (рисунок 1.3).

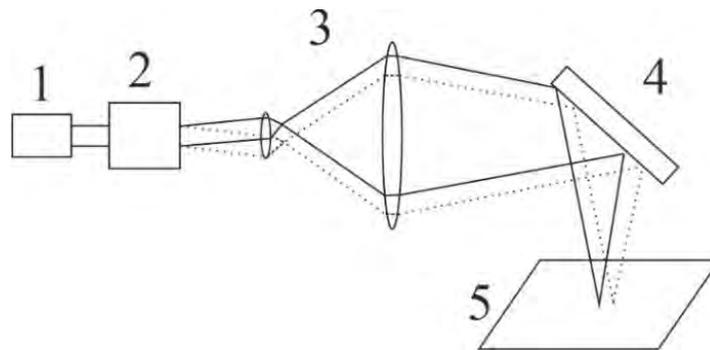


Рисунок 1.1 Оптическая схема комплементарной системы позиционирования лазерного луча [39]

В рассматриваемой схеме, лазерный пучок 1 через «низкоинерционный» сканер 2 и фокусирующую оптическую систему 3 попадает на отклоняющее зеркало «высокоинерционного» оптико-механического сканера 4 и фокусируется на поверхности обрабатываемого материала 5. «Низкоинерционный» сканер при этом может иметь значительно меньший рабочий диапазон перемещения пучка, определяемый динамическими и статическими погрешностями основного сканирующего устройства. Быстродействие «низкоинерционного» сканера для компенсации сигналов динамических погрешностей должно быть выше, чем у основного, и зависит от быстродействия основного сканера и спектральных

характеристик внешних воздействий. Такими сканерами в паре с оптико-механическими сканерами могут служить электро- и акустооптические или магнитоэлектрические устройства. Однако авторы не рассмотрели особенности управления сканерами, возникающие при реализации такой схемы, начиная от задачи сопряжения координат различных систем позиционирования и заканчивая методиками калибровки таких систем. Также в работе отсутствуют оценки зависимости общего быстродействия системы обработки и ее точности от характеристик сканеров и примеры реализации такой системы.

Вариант реализации комплементарной системы лазерной микрообработки с совместным использованием гальванометрических и акустооптических дефлекторов представлен в работе [40], где акустооптический дефлектор используется для скоростной растровой развертки пучка поперек направления перемещения, выполняемого гальванометрическими сканерами. Показано, что применение такой схемы обеспечивает скорость пучка рабочей поверхности, превышающую 2 м/с, при этом сохраняется высокая воспроизводимость позиционирования, что невозможно при использовании обычных схем позиционирования. Предложены также схемы комплементарных систем, сочетающие одновременно электромеханические линейные, гальванометрические угловые и акустооптические сканеры [41], что позволяет значительно увеличить общую площадь обрабатываемого изделия. Однако малые углы отклонения акустооптических дефлекторов делают их применение эффективным лишь для компенсации ошибок «высокоинерционного» сканера и ограничивают применение в задачах позонной обработки. Кроме этого, значительные потери мощности излучения, изменение формы сфокусированного лазерного пятна при высоких частотах сканирования акустооптических дефлекторов [42, 43], препятствуют их широкому применению в комплементарных системах позиционирования, предназначенных для микрообработки.

Другой вариант реализации комплементарной схемы, представленный в работе [22], предполагает объединение гальванометрических сканеров и линейных электромеханических приводов (рисунок 1.2).

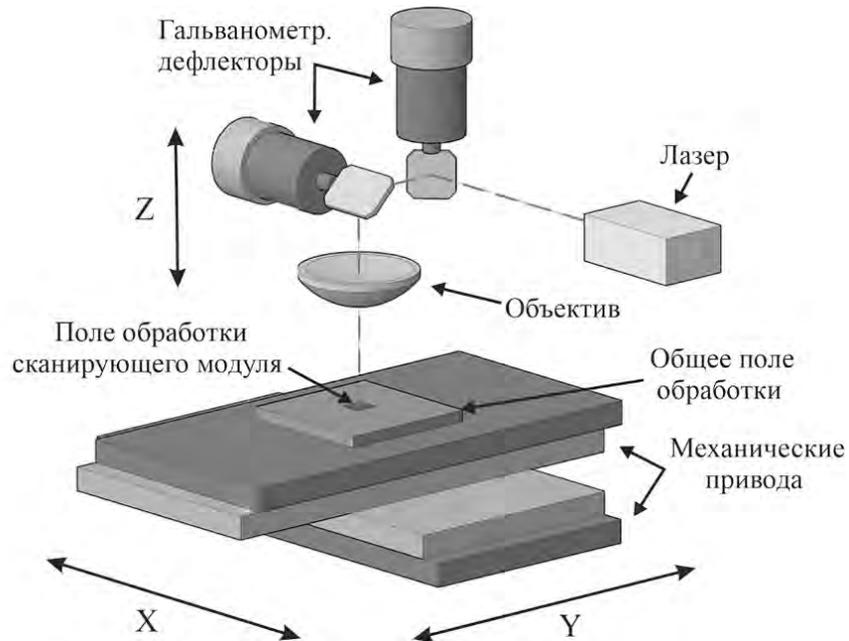


Рисунок 1.2 Схема комплементарной системы позиционирования

В такой схеме излучаемый лазерным источником пучок попадает в установленный над обрабатываемой поверхностью «низкоинерционный» сканер – сканирующий модуль, содержащий пару гальванометрических зеркальных дефлекторов с датчиками положения и фокусирующий объектив плоского поля. Сканирующий модуль осуществляет развертку сфокусированного лазерного пучка в зоне, составляющей небольшую часть от общего поля обработки. Перемещение обрабатываемого объекта относительно поля обработки сканирующего модуля осуществляется с помощью «высокоинерционного» сканера, электромеханические приводы которого оборудованы датчиками для контроля положения сканирующего модуля относительно обрабатываемого объекта. Совмещение фокальной плоскости объектива и поверхности обрабатываемого объекта осуществляется с помощью привода, изменяющего вертикальную позицию сканирующего модуля, также оснащенного датчиком положения или дистанции. При необходимости система может быть дополнена механизмами изменения углового положения или вращения обрабатываемой поверхности. Основными преимуществами такой схемы являются отсутствие искажений волнового фронта на самих дефлекторах, малые световые потери для узкополосных лазерных источников, возможность работы с источниками с большой мощностью [44] и

одновременно на нескольких длинах волн. При этом требуемое для большинства задач микрообработки быстроедействие и разрешение обеспечивается гальванометрическими дефлекторами, а большое поле обработки – электромеханическими приводами.

Для использования преимуществ комплементарной схемы при построении систем микрообработки требуется синхронно управлять как минимум двумя сканерами с различными динамическими характеристиками, источником лазерного излучения и обрабатывать сигналы с различных датчиков. Обобщенный вариант структуры управления такой системой представлен в работе [38] (рисунок 1.3).

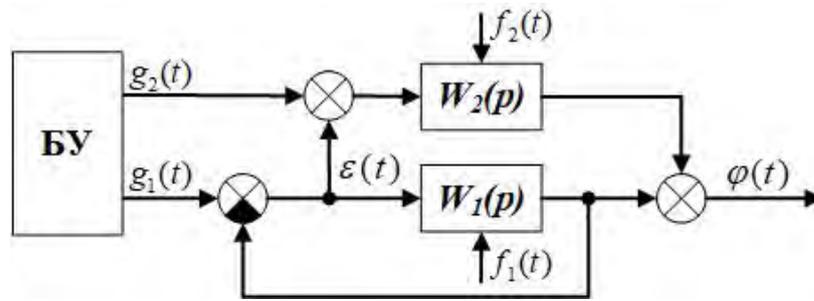


Рисунок 1.3 Структурная схема управления комплементарной системы позиционирования [38]

Задание (в случае задач микрообработки обычно представленное в виде двумерной или трехмерной САД-модели) преобразуется с помощью блока управления (БУ) в два потока управляющих данных $g_1(t)$ и $g_2(t)$. Поток данных $g_1(t)$ подается на вход замкнутой системы управления «высокоинерционного» сканера с передаточной функцией $W_1(p)$. Элемент сравнения заданного и фактического перемещения выделяет сигнал погрешности $\varepsilon(t)$, который суммируется с потоком данных $g_2(t)$ и подается на вход «низкоинерционного» сканера с передаточной функцией $W_2(p)$. Результирующее отклонение сканирующего оптического пучка $\varphi(t)$ получается в результате суммирования основного и дополнительного отклонений. Внешние возмущающие воздействия $f_1(t)$ и $f_2(t)$, вызывающие нежелательные отклонения выходных величин сканеров, могут компенсироваться контурами обратной связи. Основным режимом работы «низкоинерционного» сканера в работе считается коррекция погрешности $\varepsilon(t)$ однако также упомянут вариант управления, когда он

может быть использован для выполнения самостоятельных функций — воспроизведения символов, служебных знаков или дополнительного микрорастра, определяемых сигналом $g_2(t)$.

В работе [39] показано, что объединение двух и более сканирующих устройств в системе вызывает необходимость учета и анализа, как передаточных функций самих сканеров, так и возникающих внутренних взаимосвязей, характер которых может быть самым различным в зависимости от целей объединения, типов объединенных устройств, алгоритмов управления и т. п. На практике из-за вышеупомянутых сложностей прецизионные комплементарные системы позиционирования длительное время создавались без возможности коррекции погрешности $\varepsilon(t)$ с помощью гальванометрического сканирующего модуля [45, 46]. Так в работе [46] представлено устройство для перфорации многослойных печатных плат со следующей структурой (рисунок 1.4).

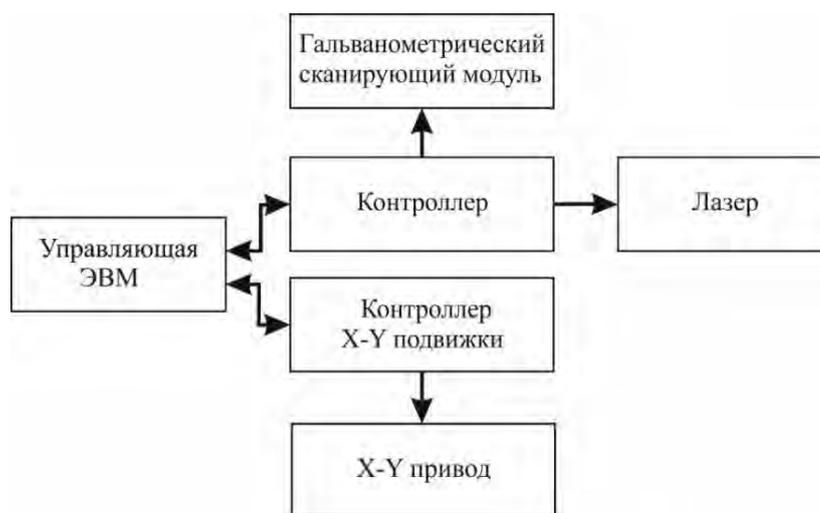


Рисунок 1.4 Структура устройства перфорации печатных плат [46]

Для обработки печатная плата закрепляется на X-Y электромеханический привод, над которым установлен сканирующий модуль на основе гальванометрических дефлекторов. Общая обрабатываемая поверхность платы разбивается на сектора, каждый из которых имеет размер не более максимального поля обработки фокусирующего объектива сканирующего модуля. Пучок лазера позиционируется внутри обрабатываемого участка поверхности печатной платы при помощи сканирующего модуля. Система управления устройства содержит два

специализированных контроллера, один из которых управляет лазерным излучателем и сканирующим модулем, а другой – X-Y приводом. За подготовку данных для обработки и синхронизацию перемещений отвечает управляющая ЭВМ.

На рисунке 1.5 показаны блок-схемы алгоритмов подготовки задания на обработку и управления устройством.

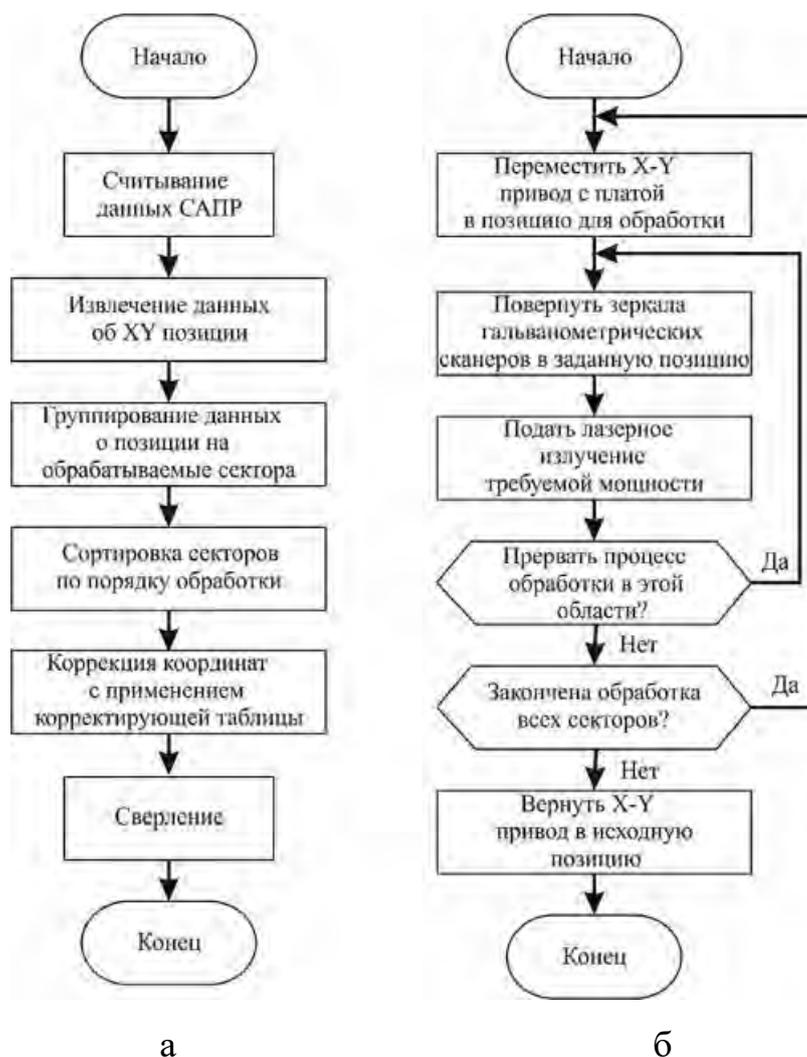


Рисунок 1.5 Алгоритмы подготовки задания на обработку и управления устройством перфорации многослойных печатных плат [46]

В процессе подготовки задания на обработку (рисунок 1.5а) происходит считывание предварительно подготовленной в САПР САД-модели, из к извлекаются данные о положении обрабатываемых объектов на печатной плате. Затем происходит группировка данных по секторам обработки, их сортировка, и к каждой из сформированных групп применяется коррекции искажений оптического

тракта системы по заранее известным табличным данным. На завершающем этапе подготовленные данные передаются на исполнительные устройства.

На рисунке 1.5б представлен алгоритм работы устройства при сверлении отверстий. В начале обработки X-Y привод перемещает обрабатываемый объект в первую позицию (сектор) и перфорация всех отверстий, которые попадают в поле обработки сканирующего модуля. Когда обработка в первом секторе завершена, происходит перемещение X-Y привода ко следующим секторам обработки. Недостатком применения данного алгоритма управления является потеря общей производительности обработки из-за длительного (сравнимого со временем обработки в малом поле) времени изменения позиции «высокоинерционного» сканера.

Комплементарные системы позиционирования с динамической коррекцией погрешности $\varepsilon(t)$ позволяют увеличить производительность за счет начала выполнения обработки до окончания переходных процессов «высокоинерционного» сканера либо организации обработки в процессе взаимного перемещения обрабатываемого материала и «низкоинерционного» сканера. Варианты реализации таких систем со сравнительно низкой точностью обработки были предложены достаточно давно, например, в патенте [47], однако на практике программные и аппаратные средства управления, позволяющие реализовать такой принцип работы комплементарных систем позиционирования, были созданы только в последние несколько лет [48, 49]. Появились также и лазерные системы микрообработки на их основе. Так в работе [50] рассматривается вариант реализации исследовательской системы лазерной обработки с линейным приводом с точностью позиционирования 5 мкм в качестве однокоординатного «высокоинерционного» сканера, сканирующим модулем с полем записи 50x50 мм. Экспериментальные результаты, представленные в работе, показывают, что при скорости перемещения лазерного пучка 300 мм/с вне зависимости от скорости перемещения линейного привода (изменявшейся от 100 до 300 мм/с) ошибки воспроизведения заданной геометрии составляли не менее 50 мкм, что недостаточно для большинства задач прецизионной лазерной микрообработки.

Исследованию точностных характеристик комплементарных систем позиционирования и их компонентов посвящена работа [51], в которой утверждается, что основное влияние на общую точность таких систем оказывает «низкоинерционный» сканер. Другими факторами, влияющими на стабильность позиционирования лазерного пучка и точность обработки, называются параметры окружающей среды, такие как температура, влажность и вибрация. В работе приводятся экспериментальные данные для нескольких конфигураций системы с размером поля обработки гальванометрического сканирующего модуля от 35x35 мм до 100x100 мм, размером общего поля обработки от 300x300 мм до 600x450 мм, точностью «высокоинерционного» сканера от $\pm 0,5$ мкм до ± 2 мкм. Погрешность микрообработки для рассмотренных конфигураций систем составила порядка 10 мкм, что не удовлетворяет требованиям к точности для прецизионных систем микрообработки.

Рассмотрим более подробно особенности управления «низкоинерционным» и «высокоинерционным» сканерами для определения возможных путей повышения точности и быстродействия сканирующих систем с комплементарной структурой.

1.2 Управление «низкоинерционным» сканером

1.2.1 Устройство и принцип работы

Применение сканирующих модулей двухкоординатной развертки лазерного пучка на базе гальванометрических зеркальных дефлекторов стало типовым решением в лазерных системах, где одновременно требуются высокие пространственное разрешение позиционирования и скорость перемещения пучка. Гальванометрические дефлекторы представляют собой электродвигатель с движущимся магнитом в качестве ротора, вращение которого обеспечивается перестройкой внешнего магнитного поля. На оси ротора закреплены зеркало и датчик углового положения. Разработкой и изготовлением таких дефлекторов занимается ряд зарубежных фирм (Scanlab, Cambridge Technology Inc.) [19, 20], а также российская компания «Атеко».

Использование гальванометрических дефлекторов с цифровым датчиком углового положения совместно с цифровыми драйверами [52] и современных телецентрических объективов, например, [53], с соотношением $L/d \sim 10^3$ (где L – размер поля обработки, d – диаметр пучка в фокусе) позволяет осуществить развертку пучка на поле в десятки миллиметров с субмикронным разрешением и ошибкой позиционирования $\delta \sim 10^{-5}$ от полного размера поля обработки. Типичная структура системы позиционирования лазерного пучка на основе гальванометрических дефлекторов представлена на рисунке 1.6.

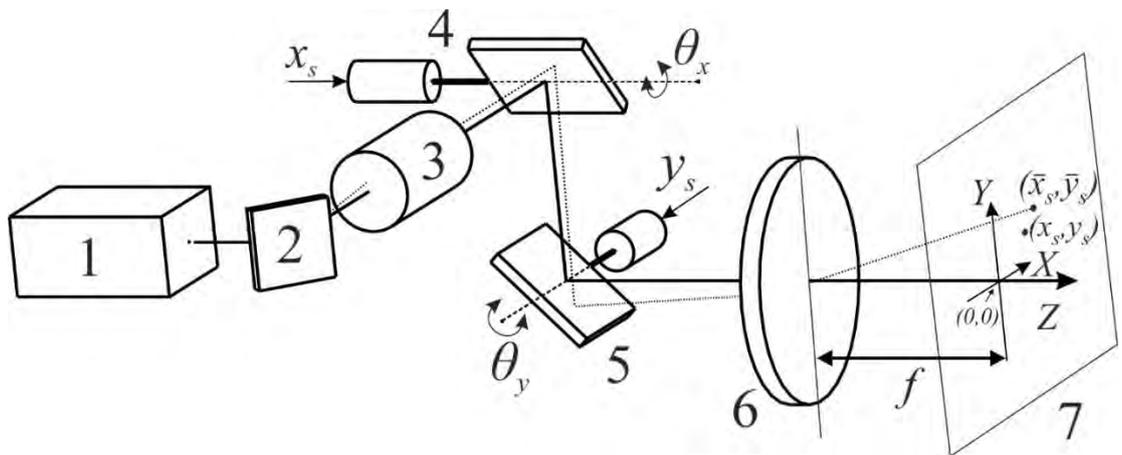


Рисунок 1.6 Структура сканирующего модуля на основе гальванометрических дефлекторов

В таких системах пучок лазера (1) проходит через систему направляющих зеркал (2) и коллиматор (3) попадает в сканирующий модуль, где отражается поочередно от двух ортогонально расположенных зеркал дефлекторов (4, 5) и направляется на фокусирующий объектив (6). Подача на дефлекторы управляющего воздействия, соответствующего расчетной позиции (x_s, y_s) , приводит к пропорциональному изменению углового положения зеркал θ_x и θ_y и перемещению лазерного пучка в рабочей плоскости записи/обработки (7). Отображение расчетных данных о положении лазерного пучка (x_s, y_s) в реальную позицию (\bar{x}_s, \bar{y}_s) происходит по закону, характер которого определяется параметрами и расположением фокусирующего объектива, конструктивными особенностями, качеством изготовления и настройки элементов оптического тракта сканирующей системы. В определенных случаях, например, при ошибках в юстировке, вызывающих

отклонение лазерного пучка от центральной оптической оси (на рисунке показано пунктирной линией), реальная позиция (\bar{x}_s, \bar{y}_s) может отличаться от (x_s, y_s) на $\Delta x_s = \bar{x}_s - x_s, \Delta y_s = \bar{y}_s - y_s$. Если возникающие отклонения $\Delta x_s, \Delta y_s$ превышают заданную относительную ошибку позиционирования δ , то могут применяться различные способы их компенсации [54, 55]. Наибольшее распространение получил способ преобразования расчетных управляющих воздействий в скорректированные $(\hat{x}_s, \hat{y}_s) = F_{xy}(x_s, y_s)$, подача которых на дефлекторы обеспечивала бы снижение ошибки позиционирования до заданного уровня.

1.2.2 Методы моделирования статических искажений оптического тракта систем микрообработки

В работе [56] для сканирующего модуля с $F\theta$ -объективом, отображение углов поворота зеркал дефлекторов, пропорциональных расчетным управляющим воздействиям, в реальную позицию на рабочей плоскости обработки (7) представлено с помощью уравнений следующего вида:

$$\bar{x}_s = \left(\frac{d_1}{\cos \theta_y} + d_2 \right) \times \tan \theta_x,$$

$$\bar{y}_s = d_1 \times \tan \theta_y,$$

где d_1 – расстояние от зеркала у до плоскости обработки, d_2 – расстояние между зеркалами дефлекторов. Покоординатные представления F_x, F_y преобразования F_{xy} в этом случае представляет собой обратные функции от представленных выражений. Использование такой аппроксимации предполагает следующие допущения:

- оси вращения зеркал перпендикулярны;
- положение лазерного пучка на зеркалах симметрично относительно их осей вращения;
- диаметр пучка мал по сравнению с размером зеркал.

Показано, что такой подход позволяет обеспечить коррекцию с относительной ошибкой позиционирования не лучше $\delta \sim 10^{-2}$.

В работе [57] представлена модель отображения координат, учитывающая возможные отклонения лазерного пучка от центральной оси оптической системы, нелинейность преобразования углового поворота зеркал в позицию, а также влияние всех возможных вариантов смещения лазерного пучка относительно центров вращения зеркал (рисунок 1.7).

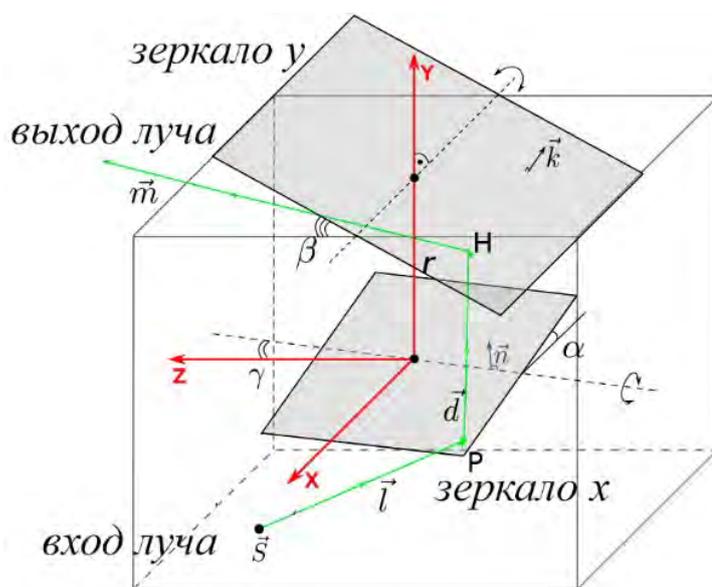


Рисунок 1.7 Варианты смещения лазерного пучка [57]

На рисунке красными стрелками обозначены оси системы координат XYZ , зелеными – ход лазерного пучка, серыми прямоугольниками два зеркала гальванометрических дефлекторов x и y , поворачивающиеся вокруг своих осей на углы α и β соответственно. За начало системы координат принята точка $O(0,0,0)$, расположенная на оси вращения зеркала x по его центру. Система координат расположена так, что ось X параллельна оси вращения зеркала y , ось Y перпендикулярна ей, а ось Z перпендикулярна плоскости XOY . В модели ось вращения дефлектора x считается наклоненной на угол γ относительно оси Z системы координат, что является часто встречающейся конструктивной особенностью современных гальванометрических сканирующих модулей. Входящий пучок может иметь произвольный угол падения, определяемый его началом \vec{S} и направлением \vec{l} . Точки P и H пересечения пучка с плоскостями зеркал x и y в результате ошибок юстировки могут быть расположены не в центре зеркал.

Для описания положения зеркала x используется вектор нормали к его плоскости \vec{n} и точка начала системы координат O . Положение нормали определяется углами α и γ , так, так как вращение выполняется вокруг наклонной оси. Производная система координат $X'Y'Z'$, получается из XYZ поворотом последней вокруг оси X на угол γ . В производной системе координат, вектор нормали $\vec{n}' = (0; 1; 0)$ перпендикулярен плоскости, когда $\alpha = 0$. В системе координат XYZ тот же вектор определяется как $\vec{n} = (0; \cos \gamma; \sin \gamma)$. При изменении угла α нормаль вращается вокруг оси Z' . Матрица поворота в этом случае имеет вид:

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Нормаль при этом будет выражена следующим образом $\vec{n} = (-\sin \alpha; \cos \alpha \cdot \cos \gamma; \cos \alpha \cdot \sin \gamma)$. Тогда точка пересечения входящего пучка с зеркалом x будет определяться следующими выражениями:

$$\vec{P} = \vec{S} + t_x \cdot \vec{l}, t_x = -\frac{(\vec{n}, \vec{O}-\vec{S})}{(\vec{n}, \vec{l})},$$

где оператор $(; \cdot)$ обозначает векторно-скалярное произведение. Пучок, отраженный от зеркала x из точки \vec{P} , имеет направление $\vec{d} = 2 \cdot (\vec{n}, -\vec{l}) \cdot \vec{n} + \vec{l}$.

Нормаль зеркала y определяется как $\vec{k} = (0; \cos \beta; \sin \beta)$, а в качестве точки вращения взята $\vec{Q} = (0; r; 0)$, где r – расстояние между зеркалами. Точка пересечения пучка с зеркалом y будет определяться следующими выражениями:

$$\vec{H} = \vec{P} + t_y \cdot \vec{d}, t_y = -\frac{(\vec{k}, \vec{O}-\vec{P})}{(\vec{k}, \vec{d})},$$

Тогда направление исходящего пучка будет выражено как $\vec{m} = 2 \cdot (\vec{k}, \vec{r}) \cdot \vec{k} - \vec{d}$, а точки пересечения исходящего пучка с плоскостью, параллельной XOY и отстоящей от него на расстояние z_0 , могут быть найдены следующим образом:

$$\bar{x}_s = H_x + \frac{z_0 - H_z}{m_z} \cdot m_x,$$

$$\bar{y}_s = H_y + \frac{z_0 - H_z}{m_z} \cdot m_y,$$

$$\bar{z}_s = z_0$$

Примеры рассчитанных с помощью данной модели искажений приведены на рисунке 1.8.

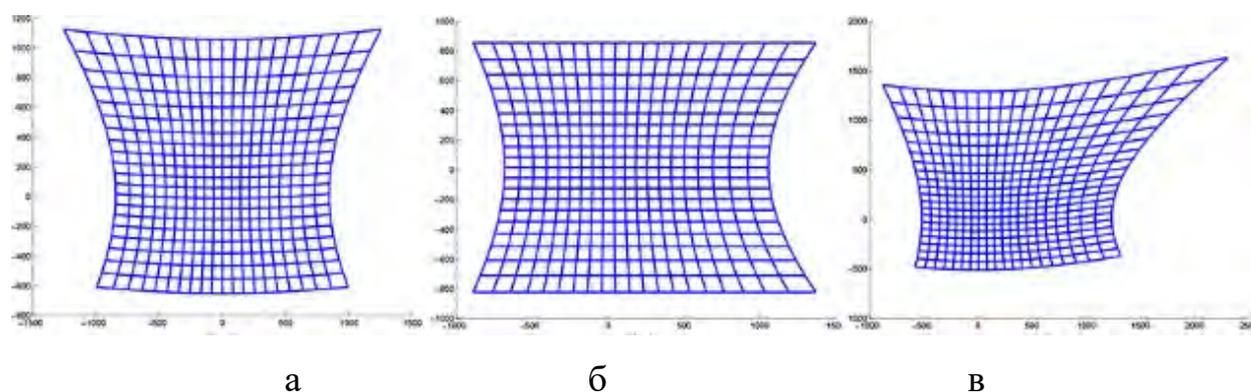


Рисунок 1.8 Примеры искажений, связанных со смещением лазерного пучка относительно оптической оси сканирующего модуля [57]: (а) позиция пучка P смещена в сторону от центра вращения зеркала O , (б) угол входа пучка в сканирующий модуль равен 15° , (в) комбинация двух предыдущих случаев

Модель достаточно точно описывает геометрические искажения и могла бы использоваться для калибровки систем лазерной микрообработки в случае использования идеального телецентрического сканирующего объектива. Однако расчет реальных объективов выполняется для строго определенного расположения зеркал дефлекторов и любые их смещения относительно расчетного положения значительно увеличивают aberrации, особенно при больших углах отклонения [58]. Кроме того, ошибки настройки элементов оптического тракта достаточно трудно поддаются измерению.

1.2.3 Калибровка оптического тракта систем микрообработки

В силу вышесказанного в прецизионных системах лазерной микрообработки чаще всего используются различные методы кусочно-линейно и полиномиального представления корректирующего преобразования F_{xy} . [59 – 65]. Для определения параметров корректирующего преобразования F_{xy} выполняется процедура калибровки, обобщенный алгоритм которой можно представить в виде следующей схемы (рисунок 1.9).

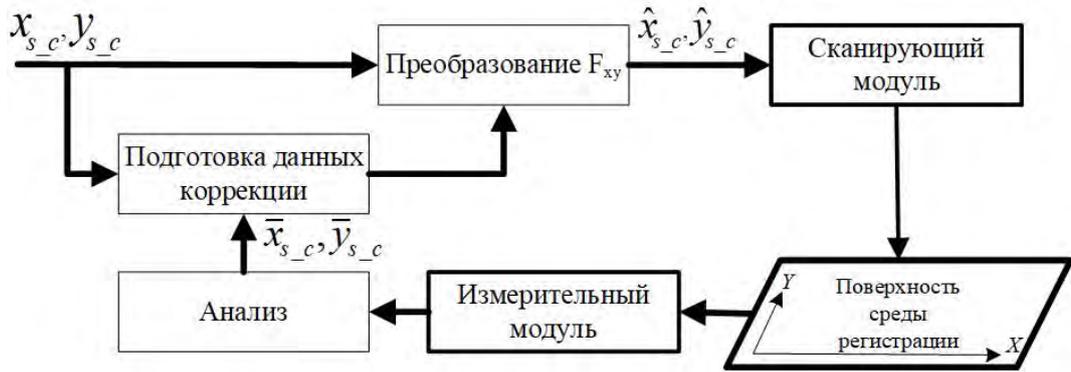


Рисунок 1.9 Функциональная схема алгоритма калибровки гальванометрического сканирующего модуля

Массив управляющих воздействий дефлекторов (x_{s_c}, y_{s_c}) , подготовленный для формирования на поверхности среды регистрации калибровочного объекта специальных элементов топологии (реперных точек), без коррекции (т.е. $\hat{x}_{s_c} = x_{s_c}, \hat{y}_{s_c} = y_{s_c}$) поступает на вход сканирующего модуля. Выполняется формирование калибровочного объекта путем развертки на поверхности регистрирующей среды сфокусированного лазерного пучка с такими параметрами, которые обеспечивают регистрацию траектории его перемещения. Далее с помощью измерительного модуля формируется карта поля обработки, содержащая информацию о зарегистрированной топологии калибровочного объекта, и выполняется ее анализ – осуществляется поиск координат реперных точек $(\bar{x}_{s_c}, \bar{y}_{s_c})$. Затем, при подготовке данных коррекции определяются различия между найденными координатами и их модельными значениями $\Delta x_{s_c} = \bar{x}_{s_c} - x_{s_c}$, $\Delta y_{s_c} = \bar{y}_{s_c} - y_{s_c}$, и выполняется поиск таких параметров преобразования F_{xy} , чтобы $\Delta x, \Delta y$ во всем поле обработки были менее заданной ошибки δ .

В качестве калибровочного объекта обычно применяется прямоугольная сетка, состоящая из N_x вертикальных и N_y горизонтальных линий, формируемая при помощи калибруемой системы по следующему алгоритму. Формирование каждой из линий выполняется путем подачи на дефлектор одной из координат управляющего воздействия, непрерывно изменяющегося в диапазоне от минимального до максимального значения $[x_{s_min}, x_{s_max}]$ (для горизонтальных линий) либо $[y_{s_min}, y_{s_max}]$ (для вертикальных линий), а на дефлектор другой

координаты соответственно $y_i = y_{s_min} + y_{step} \times i$ либо $x_j = x_{s_min} + x_{step} \times j$ (где i и j – номера выводимых линий, x_{step}, y_{step} шаг $x_{step} = \frac{[x_{s_min} - x_{s_max}]}{N_x - 1}, y_{step} = \frac{[y_{s_min} - y_{s_max}]}{N_y - 1}$). Реперными точками считаются узлы сетки, для которых определяются различия между заданными и отображенными координатами $\Delta x_{s_c}^{ij}, \Delta y_{s_c}^{ij}$. Используются и другие варианты реперных точек калибровочных объектов (отдельные перекрестья, окружности, точки), однако они не получили большого распространения.

1.2.3.1 Численные методы расчета скорректированных управляющих воздействий

Методы расчета скорректированных управляющих воздействий, предложенные в работах [60 – 62], основаны на применении различных вариантов кусочно-линейной аппроксимации преобразования F_{xy} . Так в работе [61] предложено для любой точки с координатами x_s, y_s внутри четырехугольника с вершинами из узлов корректирующие значения $\Delta x_s, \Delta y_s$ вычислять методом билинейной интерполяции, как это показано на рисунке 1.10 для оси x .

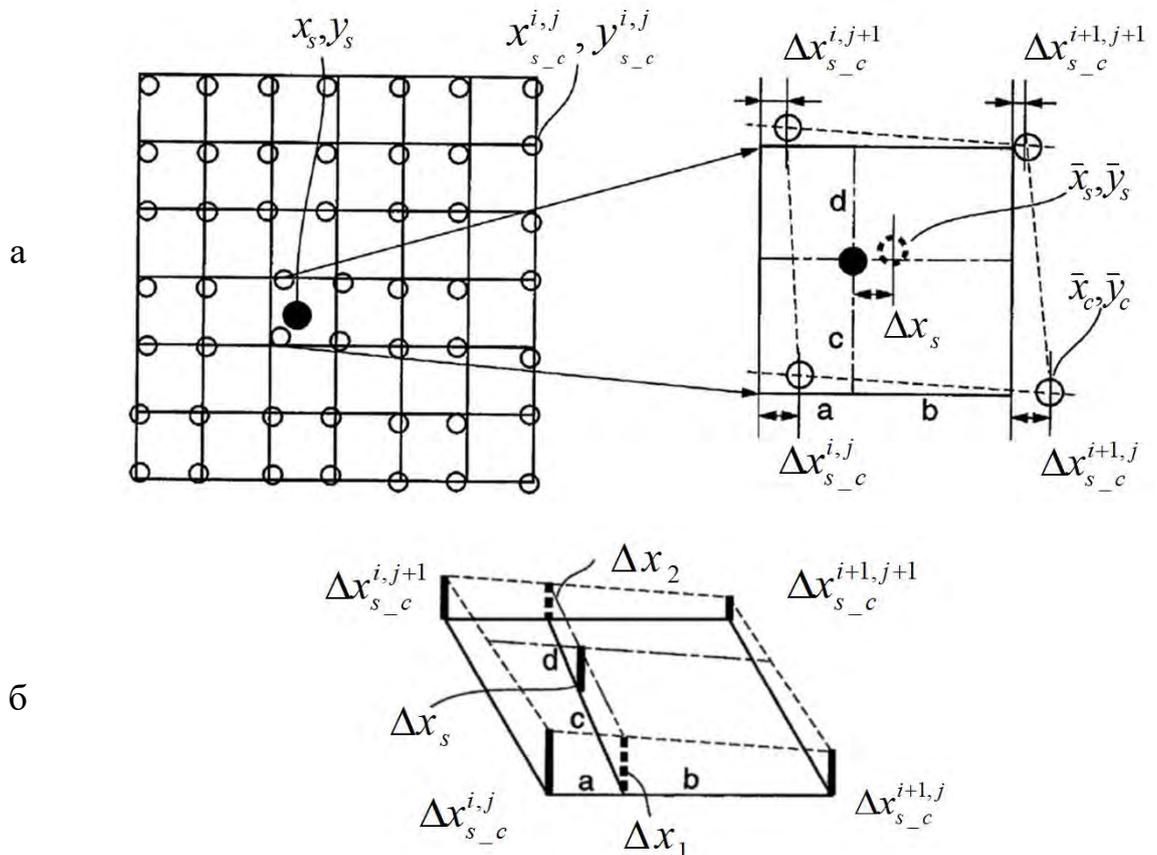


Рисунок 1.10 Поиск значения Δx_s методом билинейной интерполяции [61]

Вначале для каждой реперной точки вычисляются $\Delta x_{s_c}^{i,j} = \bar{x}_{s_c}^{i,j} - x_{s_c}^{i,j}$ (рисунок 1.10а). Затем для заданной позиции x_s корректирующее значение Δx_s может быть вычислено по известным $\Delta x_{s_c}^{i,j} - \Delta x_{s_c}^{i+1,j+1}$ вершин четырехугольника следующим образом (рисунок 1.10б):

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= \Delta x_{s_c}^{i,j} + (\Delta x_{s_c}^{i+1,j} - \Delta x_{s_c}^{i,j}) \times \frac{a}{a+b}, \\ \Delta x_2 &= \Delta x_{s_c}^{i,j+1} + (\Delta x_{s_c}^{i+1,j+1} - \Delta x_{s_c}^{i,j+1}) \times \frac{a}{a+b}, \\ \Delta x_s &= \Delta x_1 + (\Delta x_2 - \Delta x_1) \times \frac{c}{c+d}.\end{aligned}$$

Аналогичным образом вычисляется значение скорректированного управляющего воздействия Δy_s . Найденные таким образом значения используются для поиска скорректированных управляющих воздействий $\hat{x}_s = x_s + \Delta x_s$, $\hat{y}_s = y_s + \Delta y_s$.

В работе [62] показано, что данный метод позволяет достичь относительной погрешности $\delta \sim 10^{-3}$ (точности в несколько десятков микрон при размере поля обработки 120 x 120 мм²). Также в работе утверждается, что при увеличении количества линий сетки увеличивается и точность коррекции, однако при этом возникает необходимость поиска на изображении большого количества узлов.

В работах [63 – 65] предлагаются различные методы полиномиальной аппроксимации преобразования F_{xy} . Наиболее точные результаты коррекции демонстрирует метод, предложенный в работе [65], где для расчета отклонений предложено использовать модель искажений оптического тракта фотокамеры. Отклонения положения пучка от заданной позиции выражены полином 3-й степени следующего вида:

$$\begin{aligned}\Delta x_s(x_s, y_s) &= k_1 x_s (x_s^2 + y_s^2) + k_2 x_s (x_s^2 + y_s^2)^2 + k_3 x_s (x_s^2 + y_s^2)^3 + \\ &\quad + k_4 x_s^2 + k_5 x_s y_s + k_6 y_s^2, \\ \Delta y_s(x_s, y_s) &= k_7 y_s (x_s^2 + y_s^2) + k_8 y_s (x_s^2 + y_s^2)^2 + k_9 y_s (x_s^2 + y_s^2)^3 + \\ &\quad + k_{10} x_s^2 + k_{11} x_s y_s + k_{12} y_s^2.\end{aligned}$$

где $k_1 - k_{12}$ коэффициенты радиальной дисторсии, дисторсии децентрированности, дисторсии тонкой призмы, учитывающие анизотропность искажений гальванометрической системы позиционирования. Для поиска

коэффициентов полиномов используется алгоритм Левенберга — Марквардта, а значения скорректированных управляющих воздействий вычисляются рассчитываются как $\hat{x}_s = x_s + \Delta x_s(x_s, y_s)$, $\hat{y}_s = y_s + \Delta y_s(x_s, y_s)$. В работе показано, что применение данной модели при условии использования сетки 7 x 7 линий для поиска коэффициентов полинома позволяет после калибровки осуществлять обработку с ошибкой около $\delta \sim 10^{-4}$ (точность в 20 мкм при размере поля 150 x 150 мм).

Для повышения точности позиционирования лазерного пучка возможна комбинация методов полиномиальной и кусочно-линейной аппроксимации, предложенная в работе [54]. Для поиска значений \hat{x}_s , \hat{y}_s предлагается использовать выражение вида:

$$\begin{aligned}\hat{x}_s &= \hat{N}(x) + \hat{C}_x(x, y) + \hat{G}_x(x, y) + \hat{V}_x(x, y), \\ \hat{y}_s &= \hat{N}(y) + \hat{C}_y(x, y) + \hat{G}_y(x, y) + \hat{V}_y(x, y),\end{aligned}$$

где: $\hat{N}()$ – это линейная функция, учитывающая ошибки преобразования исходных данных в систему координат дефлекторов (дискретизации); $\hat{C}()$ – полиномиальная аппроксимация преобразования F_{xy} , коэффициенты которой определяются методом наименьших квадратов; $\hat{G}()$ – билинейная интерполяция по таблице ошибок, оставшихся после применения полиномиального преобразования; $\hat{V}()$ – функция, учитывающая искажения системы регистрации положения лазерного пятна. В работе используются полиномы 3-го степени и указывается, что поиск коэффициентов с использованием метода наименьших квадратов не может обеспечить точности системы более 2^{12} и требуется дополнительная коррекция по таблице.

Калибровка гальванометрических лазерных сканеров, где для аппроксимации модели поведения сканеров предлагается использовать искусственные нейронные сети с использованием статистических методов обучения, рассматривается в работах [66, 67]. Показано, что ошибка позиционирования пучка при использовании таких методов калибровки также составляет не менее $\delta \sim 5 \times 10^{-4}$.

1.2.3.2 Программно-аппаратные средства калибровки

Как показано ранее, в процессе калибровки необходимо создать калибровочный объект с помощью исследуемой системы позиционирования и выполнить его измерение. В работах [63 – 65] для решения этой задачи используются специальные измерительные системы на основе видеокамеры. Общим недостатком при использовании таких систем является недостаточное разрешение фотоматрицы, которое должно составлять не менее 16 мегапикселей для регистрации в одном кадре изображения калибровочного объекта даже при разрешении лазерной сканирующей системы 2^{12} позиций. А при калибровке лазерной системы с разрешением 2^{16} и более необходимо использовать фотоматрицу размером в несколько сот мегапикселей, что на данный момент технически невозможно. Следовательно, возникает необходимость формирования изображения из нескольких кадров, что приводит к возникновению ошибок при их сшивке. Также дополнительные погрешности при измерении калибровочного объекта в таких системах измерения могут вносить фокусирующая оптика и система освещения.

В работах [59, 68, 69] для калибровки устройства микрообработки используется встроенный модуль технического зрения. Структурная схема устройства, предложенного в работе [59], представлена на рисунке 1.11.

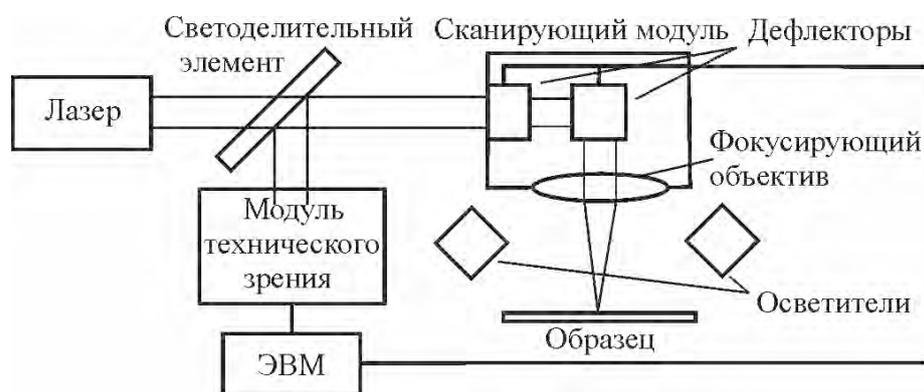


Рисунок 1.11 Структура системы со встроенным модулем технического зрения, предназначенным для ее калибровки [59]

Устройство микрообработки содержит лазер ИК диапазона, гальванометрический сканирующий модуль с двумя дефлекторами и специально разработанным

ахроматическим фокусирующим объективом, осветители видимого света с узким спектральным диапазоном излучения, модуль технического зрения, используемый как измерительное устройство, и управляющую ЭВМ. Светоделительный элемент расположен в оптической схеме так, чтобы в объектив модуля технического зрения попадал только видимый свет, отраженный от поверхности образца. Калибровка устройства выполняется в два этапа: для измерительного канала и для канала перемещения лазерного пучка (рисунок 1.12):.

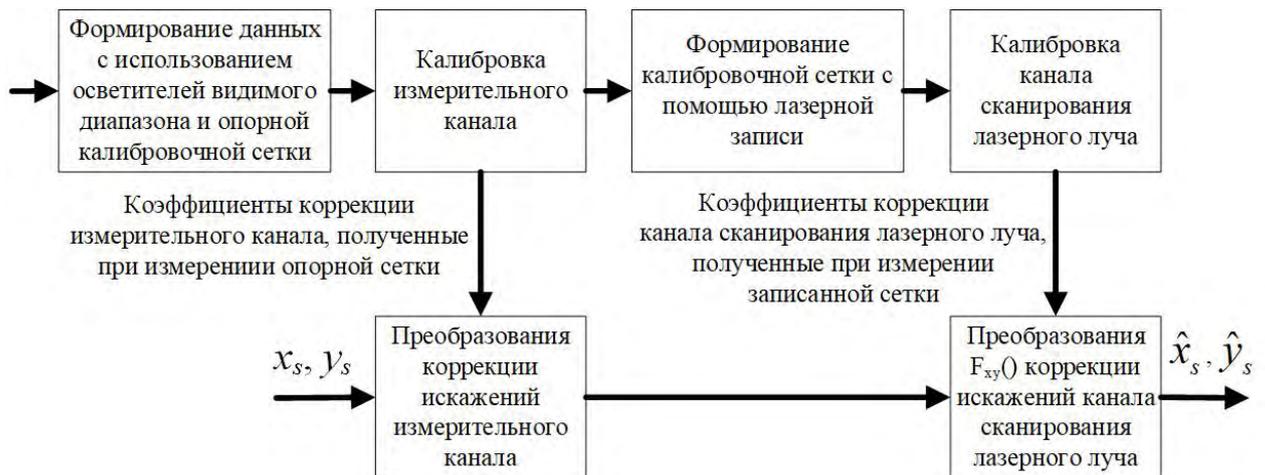


Рисунок 1.12 Алгоритм калибровки устройства микрообработки [59]

Для калибровки измерительного канала, выполняемой на первом этапе, используется тестовый объект с изображением опорной калибровочной сетки с известным шагом между линиями. Размер поля регистрации модуля технического зрения сравним с шагом между линиями и составляет небольшую часть размера поля обработки сканирующего модуля, что позволяет получать изображение узлов сетки с высоким разрешением. При выполнении калибровки поверхность освещается видимым светом, зеркала дефлекторов перемещаются координаты $x_{s_c}^{ij}, y_{s_c}^{ij}$, соответствующие расчетным позициям узлов сетки, в каждой позиции выполняется регистрация фотоизображения. По полученным изображениям определяется смещение узлов опорной калибровочной сетки и выполняется расчет коэффициентов для преобразований коррекции искажений измерительного канала.

На втором этапе калибровочный объект в виде сетки формируется с помощью устройства микрообработки по ранее описанному алгоритму. Затем выполняется регистрация фотоизображений узлов сформированной сетки, определяются

отклонения реальных координат узлов \bar{x}_{s-c}^{ij} , \bar{y}_{s-c}^{ij} от расчетных значений x_{s-c}^{ij} , y_{s-c}^{ij} и параметры преобразования F_{xy} . Определенные по такому алгоритму преобразования используются для расчета скорректированных управляющих воздействий \hat{x}_s , \hat{y}_s .

Основным недостатком рассмотренной схемы измерения является система бокового освещения, вносящая существенные погрешности при измерении калибровочного объекта и требующая создания специализированной ахроматической фокусирующей оптики из-за различия длин волн лазерного источника и осветителя. Дополнительные трудности создает использование двух разных объектов для калибровки измерительного и сканирующего каналов.

Устранить вышеназванные недостатки возможно при использовании предложенного в работе [69] устройства микрообработки со следующей структурой (рисунок 1.13).

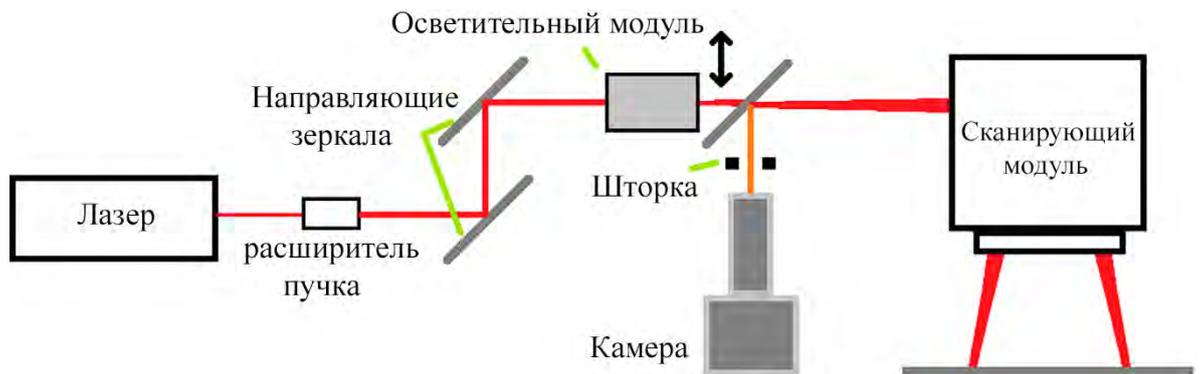


Рисунок 1.13 Структура устройства микрообработки с освещением калибровочного объекта от лазерного источника [69]

Сканирующая система содержит лазерный источник, расширитель пучка, набор направляющих зеркал и сканирующий модуль. Для калибровки используются видекамера со штормкой для ее защиты во время выполнения обработки. Основной особенностью устройства является специальный осветительный модуль, который позволяет использовать лазер как для обработки, так и для освещения калибровочного объекта. В состав осветительного модуля входят нейтральный фильтр, уменьшающий интенсивность излучения во время процесса измерения, расширитель пучка, позволяющий использовать лазерное пятно как источник

освещения, и рассеиватель, уменьшающий эффект спеклов. Осветительный модуль выполнен перемещаемым и с помощью линейного привода устанавливается в оптический тракт для выполнения измерений и удаляется при лазерной обработке.

Для выполнения калибровки сканирующей системы используется специально изготовленный калибровочный объект, представляющий собой пластину из полированного кремния с нанесенными реперными точками (рисунок 1.14а).

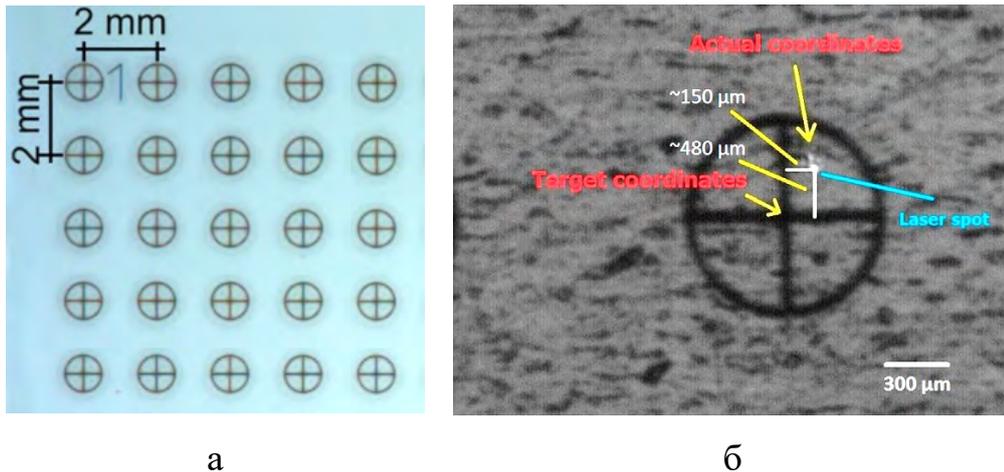


Рисунок 1.14 Использование специального калибровочного объекта для калибровки [69]: (а) фрагмент калибровочного объекта,

(б) процесс измерения отклонений лазерного пучка от заданной позиции. Точность положения реперных точек на калибровочном объекте должна быть выше, чем у калибруемой системы. Для использованного в работе объекта точность положения реперных точек составляла около 2 мкм при ширине линий около 13 мкм.

На первом этапе калибровки осветительный модуль устанавливается в оптический тракт и определяется положение реперных точек калибровочного объекта $x_{s_c}^{ij}, y_{s_c}^{ij}$ в координатах сканирующего модуля. Затем осветительный модуль извлекается из оптического тракта, устанавливается минимально возможная мощность лазерного излучения и на вход гальванометрических дефлекторов подаются управляющие воздействия, соответствующие координатам $x_{s_c}^{ij}, y_{s_c}^{ij}$. Для каждого регистрируется фотоизображение, на котором видны одновременно реперная точка и сфокусированное лазерное пятно (рисунок 1.14б),

и измеряются $\Delta x_{s_c}^{ij}$, $\Delta y_{s_c}^{ij}$ отклонения реального положения пучка от заданного. По найденным значениям выполняется расчет параметров преобразования F_{xy} .

Использование осветительного модуля, предложенного в работе, за счет использования для освещения и обработки одной и той же длины волны позволяет исключить влияние хроматические aberrаций при регистрации изображений калибровочных объектов, а специальный калибровочный объект позволяет выполнять сравнение заданных и измеренных координат без выполнения лазерной обработки. В работе показано, что для поля обработки 100×100 мм² после выполнения шести итераций калибровки ошибка позиционирования лазерного пучка составила около $\delta \sim 10^{-4}$. К недостаткам работы следует отнести отсутствие описания алгоритмов измерения калибровочного объекта и использованного программного обеспечения.

Одними из немногих доступных программных средств для измерения калибровочных объектов и поиска параметров преобразования F_{xy} являются специальное программное обеспечение GalvoCFC компании Aerotech [70] и «CorreXion pro», «SCANalign» компании ScanLab [71]. Однако в описании продукта GalvoCFC не приводятся его технических характеристик, а в документации к ПО компании ScanLab сказано, что использование координатной измерительной машины совместно с ПО «CorreXion pro» позволяет достичь точности калибровки до 20 мкм, а с помощью «SCANalign» и коаксиальной системы технического зрения – до 10 мкм (размер поля обработки производитель СПО не указывает).

Таким образом, ни в одной из рассмотренных работ не показана возможность калибровки системы микрообработки с точностью, которую теоретически позволяют обеспечить современные гальванометрические дефлекторы. Кроме того, в рассмотренных работах основное внимание уделяется алгоритмам калибровки и подготовке данных для нее, и практически не рассматривается влияние ошибок измерения и анализа калибровочного объекта на конечный результат.

1.2.4 Динамические характеристики гальванометрических дефлекторов и их влияние на точность и качество лазерной микрообработки

Другим фактором, влияющим на точность и качество микрообработки с помощью гальванометрических сканирующих модулей, являются динамические характеристики дефлекторов [72, 73], которые необходимо учитывать при разработке алгоритмов управления сканирующих модулей для точного воспроизведения заданной траектории и получения равномерной экспозиции [74].

Обычно [75] при использовании гальванометрических дефлекторов в задачах лазерной обработки для обеспечения равномерности экспозиции прямолинейные участки траектории перемещения лазерного пучка длиной L_v (далее по тексту – вектора обработки) разбиваются на микрошаги или микровектора длиной $l_{mv} \ll L_v$. Координаты микровекторов преобразуются в управляющие воздействия и подаются через равные промежутки времени t_{mv} , длительность которых обычно составляет сотни микросекунд, на вход драйвера дефлектора (рисунок 1.15).

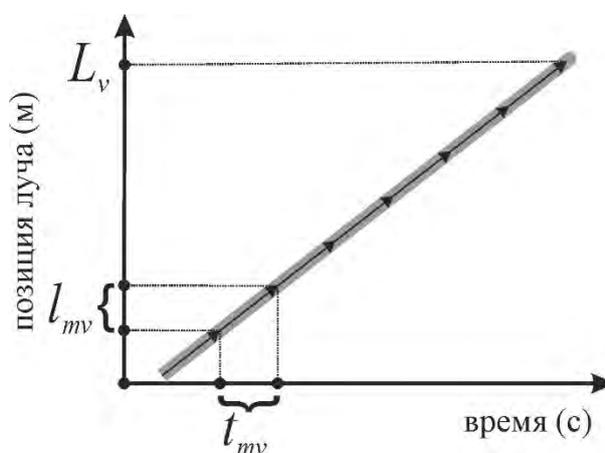


Рисунок 1.15 Разбиение вектора обработки на микровектора

При идеальной системе управления такой прием позволил бы обеспечить постоянство скорости лазерного пучка на всем протяжении. Однако в работах [76, 77] показано, что используемый в драйверах дефлекторов ПИД-регулятор не позволяет полностью компенсировать неточности системы из-за существования инерции и трения. На рисунке 1.16 показаны отличия расчетной и реальной траектории и скорости перемещения лазерного пучка из одной позиции в другую с

помощью дефлектора при включении лазерного источника в момент подачи команды перемещения и выключении сразу по окончании ее выполнения.

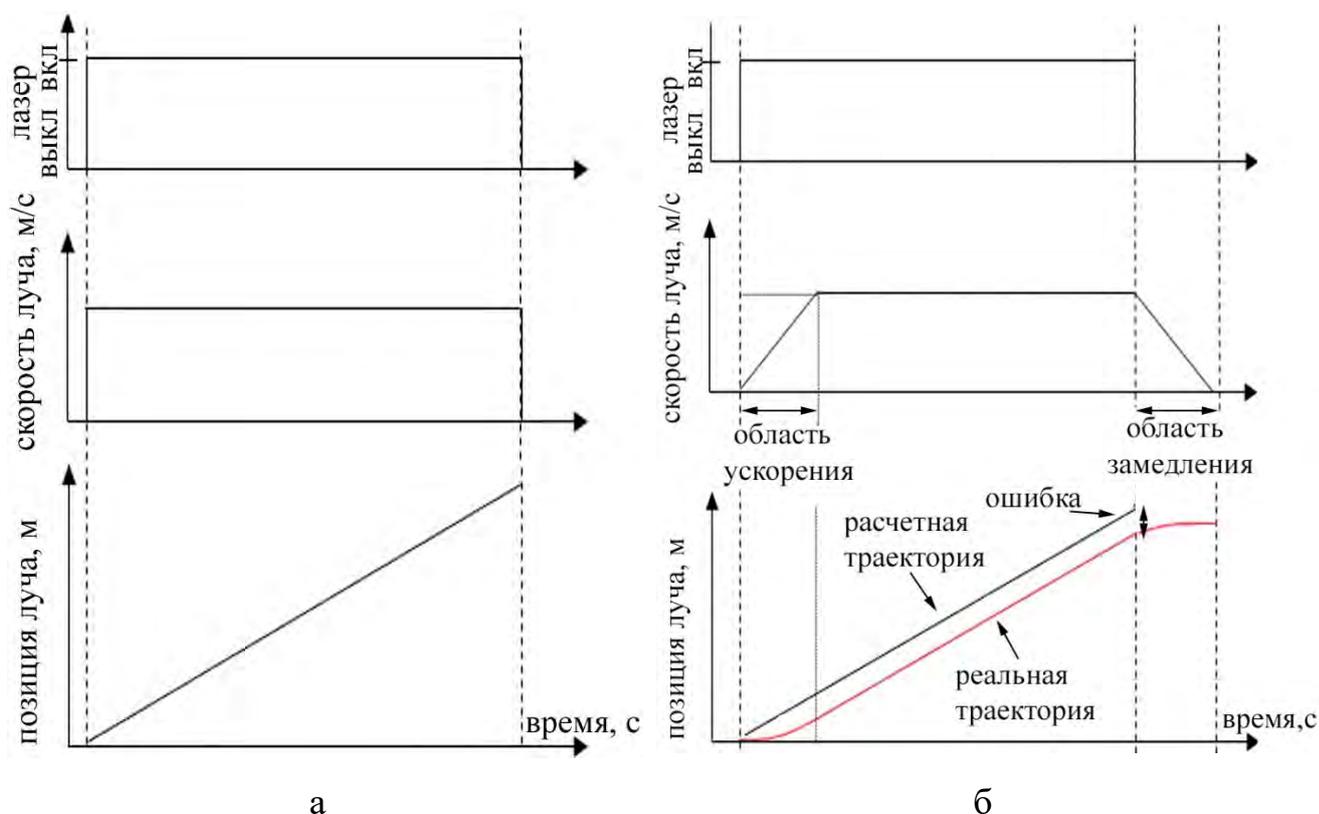


Рисунок 1.16 Траектория лазерного пучка: (а) расчетная и (б) реальная [76]

На рисунке 1.16б видно, что существует расхождение между заданной и фактической траекториями обработки, которое возникает из-за ускорения и замедления в начале и конце вектора обработки. В области ускорения возникнет неравномерность экспозиции, а конце траектории лазер будет выключен до достижения заданной позиции.

Для коррекции ошибок обработки, вызванных инерционностью дефлекторов, существует метод, предполагающий введение временных задержек между командами перемещения дефлекторов и включения/выключения лазера. Для дефлекторов обычно применяются три типа задержек: «Jump» – после перехода из одной точки поля в другую с выключенным лазером (далее по тексту – вектор перехода), «Mark» – после вектора обработки, «Poly» (или «Stroke») – между векторами обработки, если они образуют острый угол. Для лазера существует два задержек: включения и выключения, которые регулируют время разрешения/запрета подачи излучения, а также используются для компенсации

времени реакции используемого лазерного источника на поданную команду. На рисунке 1.17 показана временная диаграмма перемещения с временными задержками после перемещения «Mark» для дефлектора и включения/выключения для лазера.

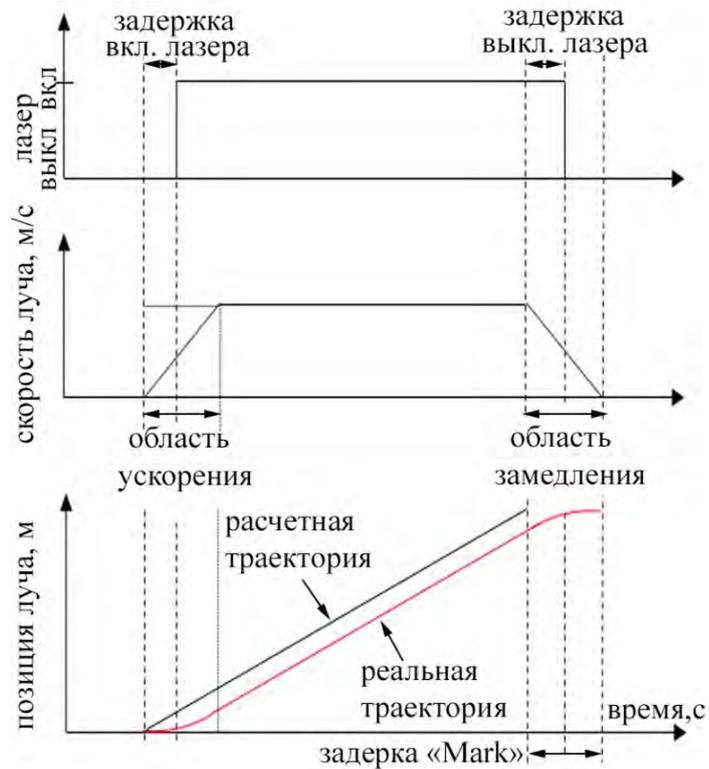


Рисунок 1.17 Траектория лазерного пучка при добавлении задержек сканера и лазера [76]

В примере на рисунке 1.17 задержка включения лазера позволяет избежать неравномерной экспозиции в начале вектора обработки, задержка его выключения – прервать подачу излучения по достижении заданной позиции, а задержка «Mark» дефлектора – обеспечить окончание перемещения лазерного пучка в заданную позицию до подачи следующих векторов.

В работе [76] наглядно продемонстрированы ошибки обработки, связанные с механической инерционностью дефлекторов и проявляющиеся при высоких скоростях перемещения пучка (рисунок 1.18).

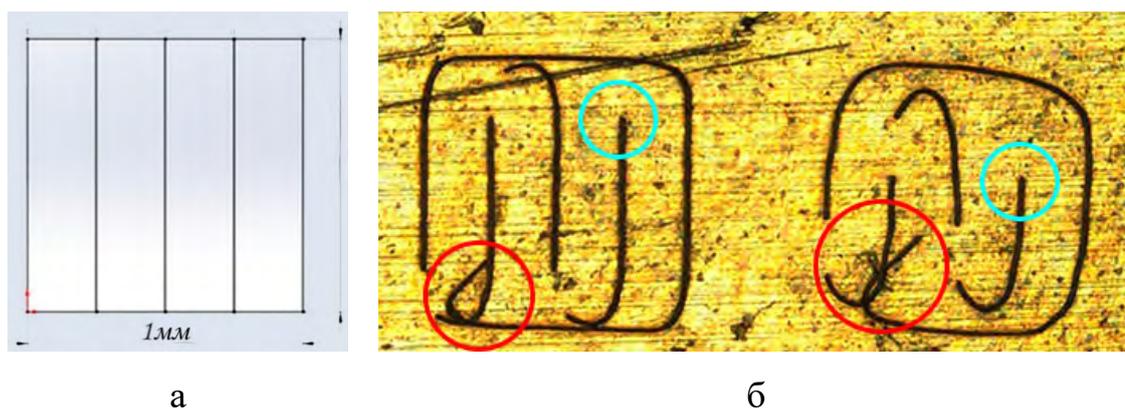


Рисунок 1.18 Влияние динамических характеристик deflectоров на точность лазерной обработки [76]: (а) целевая геометрия – квадрат со стороной 1 мм, (б) результаты записи на скорости 1 м/с и 2 м/с

При выполнении задания (рисунок 1.18а) deflectоры не успевают достичь заданного положения и формируются дефекты обработки, которые увеличиваются с ростом скорости перемещения (рисунок 1.18б). На рисунке показаны два типа дефектов: в виде «хвостов» в начале каждого отдельного участка траектории лазерного пучка (обозначены красными окружностями), требующих введения задержки «Jump», и прерванных линий в конце (обозначены голубыми окружностями) для устранения которых нужны задержки «Mark» и выключения лазера. По изображению можно видеть, что постоянная времени deflectоров, определяющая размер области ускорения и замедления, примерно равна 100 мкс. Введение вышеописанных временных задержек минимизирует (или даже устраняет) такие дефекты и может существенно улучшить точность обработки (рисунок 1.19).

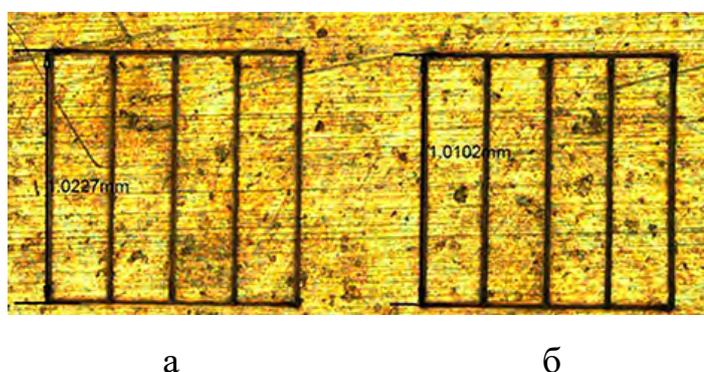


Рисунок 1.19 Результат обработки с при добавлении задержек deflectоров: (а) ~150 мкс для скорости 1 м/с, (а) ~300 мкс 2 м/с [76]

Однако определение точных значений задержек может быть очень трудоемкой задачей, требующей выполнения большого числа физических экспериментов, поскольку задержки должны быть оптимизированы для разных скоростей обработки, а также для разных геометрий. Другим недостатком такого метода является снижение общей скорости микрообработки. Кроме того, вводимая задержка включения лазера не позволяет обеспечить равенство экспозиции на разгонном участке вектора обработки.

В случае использования импульсного лазера обеспечить равенство экспозиции на всей длине вектора возможно с помощью алгоритма синхронизации подачи лазерных импульсов с движением дефлекторов (рисунок 1.20), рассмотренного в работах [76, 77].

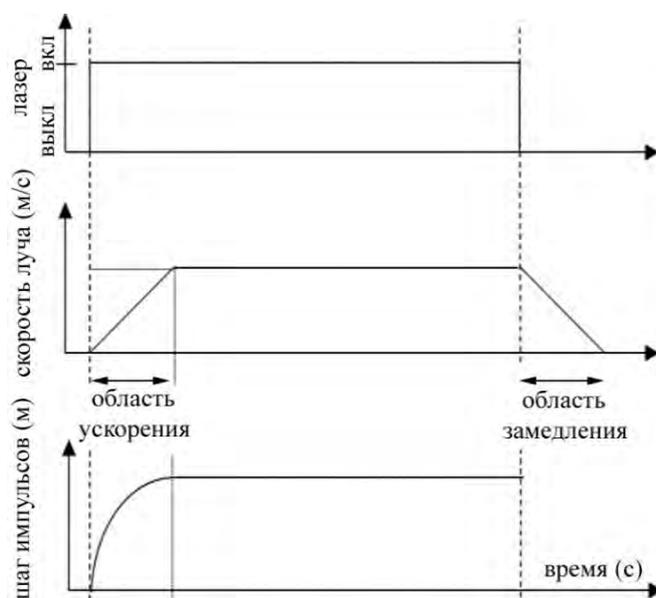


Рисунок 1.20 Временная диаграмма алгоритма изменения расстояния между импульсами в зависимости от скорости дефлекторов [76]

Алгоритм предполагает строгую привязку первого импульса к начальной позиции обрабатываемого элемента задания по сигналам датчиков положения дефлекторов и изменение шага между лазерными импульсами в зависимости от скорости перемещения лазерного пучка. Такой алгоритм позволяет при использовании современных лазеров со сверхкороткими импульсами и правильном выборе экспозиции получить высокое качество края деталей и точность соответствия

заданию на обработку. К недостаткам такого метода следует отнести небольшой процент лазеров, которые бы позволяли реализовать такую синхронизацию.

Другой способ коррекции вызванных инерционностью дефлекторов ошибок обработки – «SkyWriting», рассмотренный в работе [78], основан на добавлении так называемых «петель» перехода. Его отличия от традиционной схемы с задержками показаны на рисунке 1.21б.

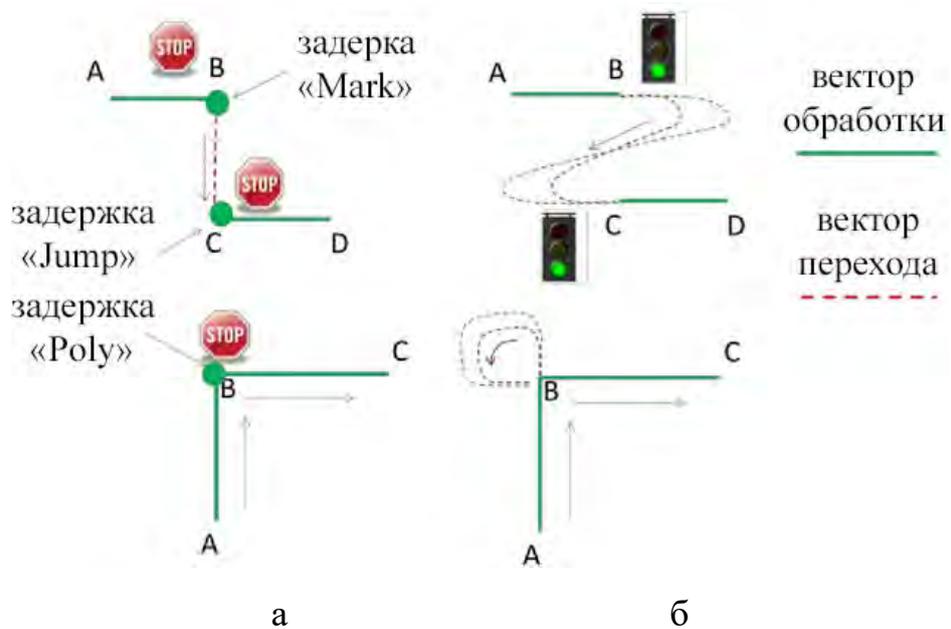


Рисунок 1.21 Компенсации инерционности дефлекторов с помощью:

(а) задержек, (б) добавления «петель» [78]

При обычной схеме управления (рисунок 1.21а) дефлектор всегда останавливается после векторов перехода и обработки. В отличие от этого, при использовании способа «SkyWriting» (рисунок 1.21б), скорость на всей длине вектора обработки может быть одинаковой. При обработке отдельных векторов А-В и С-Д (верхняя часть рисунка 1.21б), дефлектор будет перемещать пучок заданной скоростью. Для перехода от точки В к С заранее рассчитывается траектория перехода в зависимости от скорости. Если скорость перемещения пучка установлена малой, то траектория перехода будет более короткой (обозначена красной штриховой линией); при увеличении установленной скорости путь будет увеличиваться. Для последовательно обрабатываемых векторов А-В-С (нижняя часть рисунка 1.21б), в

зависимости от значения угла между векторами обработки и заданной скорости перемещения пучка, определяется должен ли дефлектор следовать заданной траектории, или ему нужно покинуть траекторию через «петлю» перехода и затем вернуться на нее с той же скоростью. Такой способ значительно повышает равномерность экспозиции и точность микрообработки, однако, как и способ с задержками, снижает общую ее производительность.

Предложенные в работах [79, 80] специальные программные средства позволяют уменьшить задержки и тем самым увеличить производительность лазерной обработки при сохранении ее точности и качества. В работе [79] для этого на основании массива экспериментальных данных, включающего результаты обработки отдельных линий с различными скоростями, строится эмпирическая модель, характеризующая фактическую динамическую реакцию системы отклонения пучка во всем диапазоне доступных скоростей. Регрессионная модель определяется как $l_a \approx f(V, \beta)$, где l_a -длина области ускорения, V – скорость перемещения пучка, а β -параметры регрессии. Применяя эту модель, для всех векторов задания выполняется смещение начальной и конечной координат элементов обработки, величина которого зависит от скорости перемещения пучка. Недостатком такого подхода является необходимость предварительной подготовки данных для обработки, что исключает возможность обработки в процессе взаимного перемещения сканирующего модуля и обрабатываемого материала.

Из работ [81, 82] известно также об использовании алгоритмов адаптивного обратного управления (инверсного нейроуправления) и итеративного обучения для уменьшения влияния динамических искажений гальванометрических дефлекторов при одновременном увеличении производительности микрообработки. Однако на данный момент их применение ограничивается узким кругом задач обработки, в которых перемещения имеют повторяющийся характер. Кроме того, применению таких алгоритмов могут помешать встроенные адаптивные фильтры драйверов современных прецизионных дефлекторов с цифровым датчиком положения.

Таким образом, ни один из известных методов компенсации ошибок обработки, вызванных особенностями динамических характеристик

гальванометрических дефлекторов, не является универсальным. Программно-аппаратные средства управления системами лазерной микрообработки должны обеспечивать возможность выбора способа компенсации таких ошибок в зависимости от решаемой задачи и используемого лазерного излучателя.

1.3 Управление «высокоинерционным» сканером в задачах прецизионного позиционирования

«Высокоинерционный» сканер комплементарной системы позиционирования состоит из нескольких электромеханических сервоприводов, объединенных в одну кинематическую схему для перемещения сканирующего модуля и обрабатываемого изделия относительно друг друга. Под сервоприводом понимается система, состоящая из мотора, исполнительного механизма и датчиков обратной связи для контроля заданных параметров движения [83]. Современные сервопривода обеспечивают точность позиционирования до $\pm 0,2$ мкм, воспроизводимость до ± 50 нм при длине пробега до 500 мм [84 – 86]. При максимальной точности массе нагрузки в несколько десятков килограмм скорость перемещения может быть равной 0,1-0,5 м/с. Перемещение может осуществляться с помощью вентильного или шагового электродвигателя посредством передачи винт-гайка, либо непосредственно якорем линейного двигателя, главным преимуществом которых является отсутствие вращающихся и переключающихся контактов, а значит очень большой ресурс. Использование шаговых двигателей (ШД) позволяет создавать относительно недорогие, простые в управлении электромеханические привода [87]. Однако чаще всего в современных высокоточных приводах сервоприводах применяются синхронные вентильные электродвигатели постоянного тока (BLDC) [88], которые обеспечивают большой вращающий момент и максимальную частоту вращения по сравнению с ШД.

Для контроля позиции сервопривода могут использоваться встраиваемые оптические датчики положения с фотоэлектронной считывающей головкой и инкрементной линейкой, выполненной из специальных сплавов или кварца [89 – 91]. Такие датчики позволяют определять позицию с разрешением до десятых

долей нм (ошибка интерполяции до $\pm 0,01$ нм) и абсолютной точностью до $\pm 0,5$ мкм на длине 1 м. В задачах с предельными требованиями к измерению точности позиционирования могут использоваться интерферометрические датчики положения [92] с разрешением до 38,6 пм и точностью до 10 нм.

В простейшем случае для управления сервоприводом с BLDC мотором достаточно реализовать только обратную связь по положению [93]. В целях повышения стабильности и увеличения отклика привода в систему вводят обратную связь по скорости [94], однако при управлении вентильным мотором классическим трапецевидным сигналом (с использованием датчиков Холла) на малых скоростях появляются значительные колебания вектора магнитного поля, что приводит к рывкам приводимого в движение механизма. Обеспечить плавность хода в широком диапазоне скоростей позволяет метод векторного управления [95 – 97], при котором управляя токами в обмотках, можно создавать в статоре магнитное поле произвольного направления и величины

При объединении отдельных сервоприводов в единую кинематическую схему фактическое положение и ориентация рабочего инструмента относительно обрабатываемого объекта отличается от номинального положения и ориентации. Анализ, моделированию ошибок и калибровке многокоординатных электромеханических систем посвящено достаточно много исследований. Так в работе [98] исследуется влияние элементов в замкнутой структуры обрабатывающих центров и координатно-измерительных машин: подшипников, корпуса, направляющих и основания, приводов, инструмента и рабочих приспособлений, на их точность. Из-за изменения геометрии этих структурных компонентов конструкции фактическое положение и ориентация инструмента относительно заготовки отличается от заданных номинального положения и ориентации, что приводит к ошибке позиционирования. Основными факторами, влияющими на точность машины, называются кинематические ошибки; термомеханические ошибки; величина нагрузки, динамические силы.

В работе обобщаются доступные технологии для определения и измерения ошибок геометрии для таких кинематических схем. Полученные данные об

ошибках могут быть использованы как для механической настройки компонентов машины, так и для «программной (или численной) коррекции» – создания цифровой данных для компенсации в процессе работы.

Выделяется два возможных варианта компенсации ошибок:

1. Компенсация конечного положения рабочего инструмента.
2. Непрерывная компенсация траектории в движении с помощью контроллера ЧПУ (преобразование интерполированных точек в реальном времени).

В работе [99] рассматривается реализация системы с компенсацией конечного положения инструмента в которой предлагается использовать систему датчиков, измеряющих текущее положение для последующей рекурсивной коррекции конечной координаты, однако при использовании такого подхода все ошибки геометрии в процессе перемещения остаются некомпенсированными.

Разработка моделей геометрических ошибок многокоординатных систем для реализации непрерывной компенсации рассматривается в работах [100, 101]. Предложенные методы моделирования ошибок позволяют однозначно идентифицировать ошибки геометрического источника, влияющие на точность компенсации и показывают высокую вычислительную эффективность при численном моделировании без учета нелинейных эффектов. Показано, что использование данных алгоритмов обеспечивает точность позиционирования рабочего инструмента 1,4 мкм в плоскости XY размером 400x400 мм². Другой вариант непрерывной компенсации ошибок – применение специальных программных средств – пост-процессоров [102]. Представленный в работе метод компенсации основан на коррекции расчетной траектории по критерию уменьшения отклонения между проектируемой и реальной траекторией инструмента. Экспериментально показано, что применение итеративного алгоритма компенсации позволяет достичь точности позиционирования рабочего инструмента в 0,5 мкм.

Для измерения параметров многокоординатных систем на основе электромеханических сервоприводов используются такие средства как как лазерный комплекс XL-80 [103] от компании Renishaw, которые обеспечивают

точность измерений $\pm 0,5$ мкм на длине 1 м, разрешение до 1 нм при скорости перемещения до 4 м/с. Специализированное программное обеспечение QuickViewXL [104], входящее в состав измерительных средств, позволяет исследовать, анализировать и характеризовать параметры движения привода, такие как линейность, время ускорения до скорости движения, перебег и расчетное время на целевых позициях, а также резонанс и затухающие колебания. Данные, полученные при калибровке, в дальнейшем используются для компенсации ошибок перемещения, например, опция Aerotech HALAR (High Accuracy Linear and Rotary) [105].

Таким образом современные электромеханические многокоординатные системы и алгоритмы управления ими позволяют осуществлять позиционирование с точностью до десятых долей микрона. Для достижения таких характеристик программные средства управления сервоприводов должны включать в себя модули коррекции позиции по предварительно измеренным калибровочным данным.

На общую производительность системы позиционирования с комплементарной структурой будет влиять скорость перемещения сервоприводов в заданную позицию, которая зависит от инерционности подвижных частей привода (с учётом перемещаемого груза), характеристик сервомотора и настройки регуляторов сервопривода [106]. Кроме того, в установившейся позиции некоторое время продолжают затухающие колебания подвижной части сервопривода с нагрузкой (рисунок 1.22), которые могут приводить к появлению ошибок лазерной обработки.

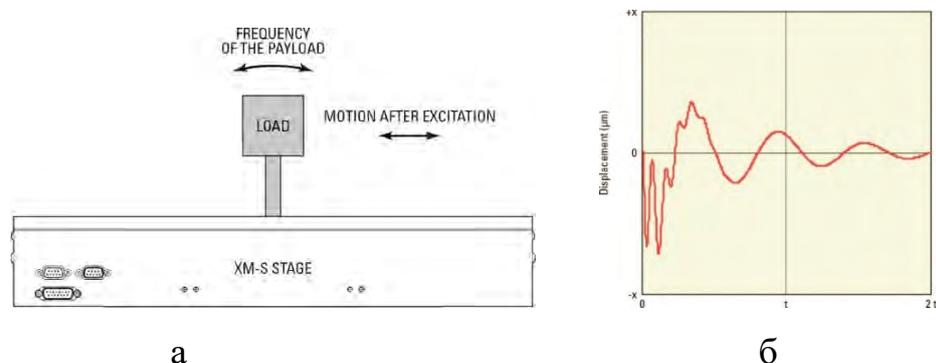


Рисунок 1.22 Пример затухающих колебаний подвижной части электромеханического сервопривода в установившейся позиции [85]

Длительность, амплитуда и форма колебаний зависят от нагрузки и точности настройки системы управления сервопривода. Типичное время стабилизации позиции при перемещаемой массе в несколько десятков килограмм может находиться в диапазоне от нескольких десятков миллисекунд до единиц секунд, частота колебаний может составлять десятки герц. Во избежание ошибок лазерной обработки, связанных с такими колебаниями, обычно вводится задержка после окончания перемещения сервопривода, равная времени стабилизации координаты. Другой возможностью избежать таких ошибок является уменьшение скорости перемещения сервопривода. Однако любое из этих решений значительно уменьшает быстродействие комплементарной системы позиционирования, особенно если соотношение общей площади обрабатываемой поверхности к размеру рабочего поля сканирующего модуля велико, а время обработки в одном поле сканирующего модуля сравнимо с временем стабилизации приводов «высокоинерционного» сканера. Необходимо предложить средства для компенсации колебаний, которые позволили бы уменьшить суммарное время обработки.

1.4 Выводы по первой главе.

1. В рассматриваемых комплементарных системах позиционирования лазерного пучка основной вклад в ошибки микрообработки вносят статические искажения, связанные с конструктивными особенностями их оптического тракта. Предложенные на данный момент методы и программные средства коррекции таких ошибок не позволяют полностью использовать точностные характеристики современных гальванометрических дефлекторов.
2. Существующие программно-аппаратные средства компенсации ошибок положения лазерного пучка, возникающих в процессе перемещения или стабилизации приводов «высокоинерционного» сканера, либо не обеспечивают нужной точности обработки, либо предполагают предварительную подготовку скорректированного задания на обработку (пост-процессор), что не позволяет применять их для обработки в движении.

3. Точность электромеханических приводов «высокоинерционного» сканера, входящих в состав комплементарных систем позиционирования может быть субмикронной. Для ее обеспечения программные средства управления системы должны обеспечивать коррекцию позиции приводов по калибровочным данным.
4. Программно-аппаратные средства управления высокопроизводительными комплементарными системами лазерной микрообработки для достижения микронной точности должны обеспечивать синхронное управление «высокоинерционным», «низкоинерционным» сканерами и лазерным источником, учитывающее особенности их динамических характеристик.

Глава 2 Разработка методов коррекции статических искажений, вносимых компонентами оптической системы и динамических ошибок позиционирования электромеханических приводов

В первом разделе главы представлен метод высокоточной калибровки оптического тракта комплементарных систем позиционирования, основанный на двухшаговом итерационном алгоритме обработки профилометрической карты калибровочного объекта, и алгоритме коррекции статических ошибок положения лазерного пучка методом кусочно-планарной интерполяции. Во втором разделе рассмотрен алгоритм компенсации динамических ошибок позиционирования приводов «высокоинерционного» сканера с помощью «низкоинерционного» сканера на основе гальванометрического сканирующего модуля. Приводятся результаты его верификации, выполненной с использованием математической модели сканирующего модуля. Показаны результаты экспериментальной проверки эффективности предложенных методов.

2.1 Метод калибровки оптического тракта комплементарных систем позиционирования для устройств микрообработки с субмикронным разрешением и микронной точностью

В предыдущей главе показано, что известные методы калибровки сканирующих модулей не обеспечивают точности, сравнимой с предельными характеристиками дефлекторов. Точность рассмотренных устройств с комплементарной системой позиционирования с не превышает нескольких микрон, в то время как для некоторых задач, таких как, например, изготовление сеток и шкал для оптических приборов, требуется субмикронная точность при площади изделия до нескольких сотен квадратных сантиметров [107]. Для повышения точности и разрешения, предложены метод, технологические и программные средства калибровки оптического тракта комплементарных систем позиционирования [29].

2.1.1 Формирования и измерение калибровочных объектов

Как было показано в первой главе, формирование калибровочных объектов может выполняться с помощью калибруемой системы микрообработки методами изменения оптической плотности материала и гравирования материала среды регистрации. Используемые материалы должны быть однородными, с оптическим качеством поверхности и достаточным поглощением в диапазоне длин волн используемого источника. При этом сформированный на материале калибровочный объект уже не может быть определен как однозначное отображение массива координат x_c, y_c на плоскость XU поверхности среды регистрации, поскольку содержит как случайные ошибки – управления дефлекторами, шум лазерного источника, влияющий на размер формируемых элементов, шум материала и процесса регистрации (рисунок 2.1а), микродефекты поверхности (рисунок 2.1б), так и систематические – например изменение размера лазерного пятна в плоскости записи из-за aberrаций объектива (рисунок 2.1в).

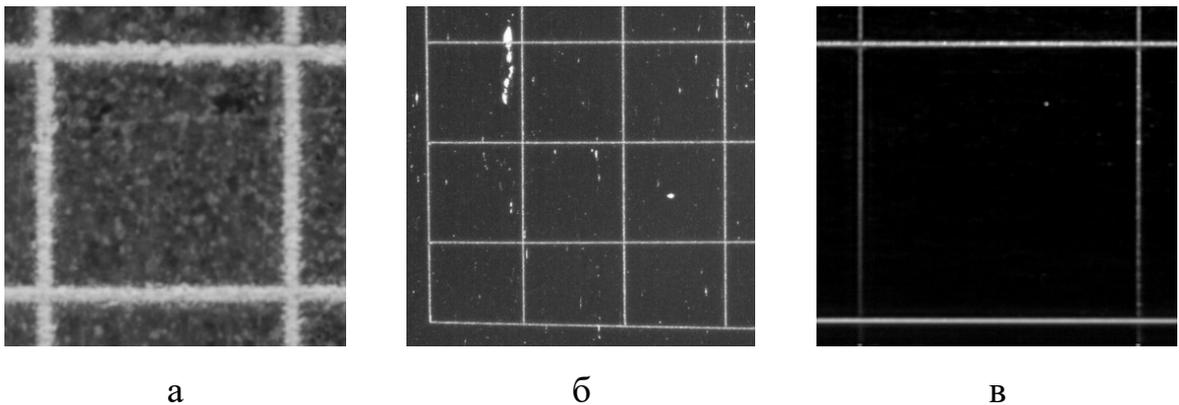


Рисунок 2.1 Фрагменты калибровочных объектов с различными дефектами:

(а) материал AlumaMark, лазер 10,6 мкм, размер ячейки 1 мм;

(б) полированный кремний, лазер 1028 нм, размер ячейки 0,187 мм;

(в) лазерная пленка, лазер 532 нм, размер ячейки 4,375 мм

Основным инструментом для регистрации изображения калибровочного объекта является система технического зрения на основе фотоматрицы и объектива, типичное разрешение которой не превышает 10 Мпикс. При необходимости получить разрешение и точность на уровне 10^{-5} от измеряемого поля, используются измерительные системы, осуществляющие позонную съемку путем перемещения камеры относительно измеряемого объекта. Однако при формировании

изображения из нескольких кадров возникают ошибки стыковки, связанные с геометрическими искажениями (0,1 – 1%) [108] фокусирующих объективов видеосистем.

Используя пороговый характер процесса гравирования и считая распределение плотности мощности в сфокусированном лазерном пучке гауссовым, в результате обработки возможно получить отдельные линии шириной менее размера сфокусированной в фокальной плоскости точки. Поперечный профиль глубины таких линий будет в первом приближении также иметь гауссово распределение. Применение сканирующей профилометрической системы с точечным бесконтактным сенсором для измерения подобных объектов обеспечивает существенно меньшие погрешности определения параметров линии, чем при использовании системы технического зрения, поскольку отсутствуют искажения, вносимые оптическими элементами такой системы (как освещающей, так и приемной частей). Проиллюстрируем эффективность данного подхода на примере калибровочного объекта в виде сетки, отгравированной на полированной кремниевой пластине при помощи лазерной сканирующей системы с диаметром лазерного пятна в фокусе по e^{-2} – 5 мкм (рисунок 2.2).

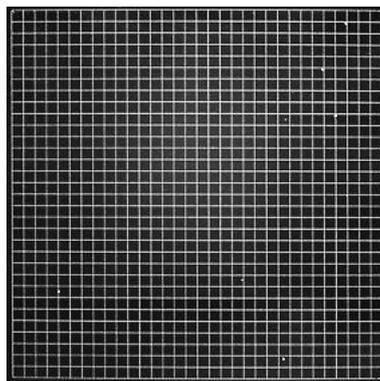


Рисунок 2.2 Изображение калибровочной сетки, размер 6x6 мм², 33x33 линии шириной 5 мкм

Изображение сетки получено с помощью модуля технического зрения, содержащей видеокамеру IDS Imaging с разрешением 3840x2748 и размером пикселя 1,67 мкм [109], и телецентрический объектив Endmund Optics с кратностью 1,0X [110]. На рисунке 2.3а, показан увеличенный фрагмент сетки (верхний левый угол), на

рисунке 2.3б - усредненный профиль интенсивности линии сетки на участке изображения, выделенном желтым прямоугольником.

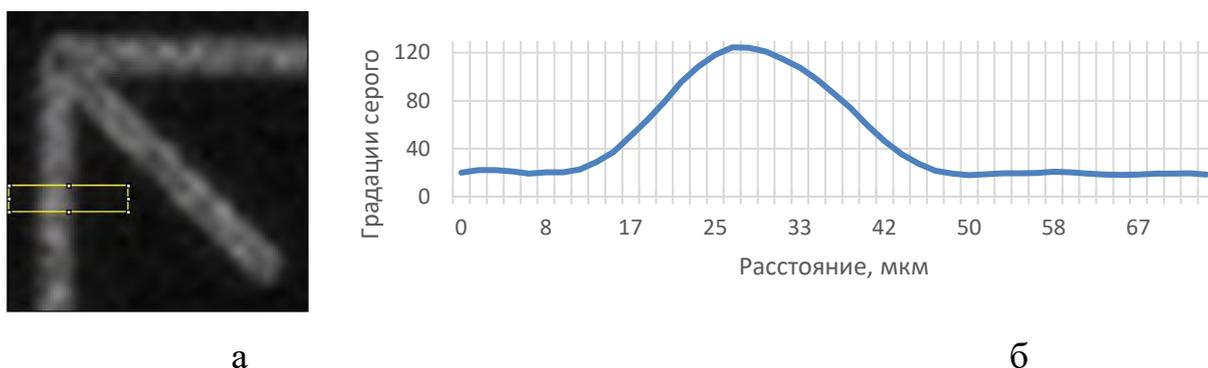


Рисунок 2.3 Изображения (а) фрагмента фотоизображения калибровочной сетки и (б) усредненного профиля интенсивности линии

Большая видимая ширина линий на рисунке 2.3а объясняется наличием микрочастиц удаленного лазерным излучением материала по сторонам от линии, которые фиксируются камерой как ее часть.

На рисунке 2.4а показана профилограмма того же фрагмента сетки (яркость кодирует глубину), полученная с помощью профилометра с конфокальной хроматической системой Stil SA [111] в качестве датчика расстояния (контроллер Optima, измерительная головка CL1 MG210 с разрешением по оси Z – до 5 нм), и системой перемещения измеряемого образца размером до 200x200 мм² с разрешением 100 нм, точностью позиционирования $\pm 0,4$ мкм и воспроизводимостью $\pm 0,1$ мкм. На рисунке 2.4б показан поперечный профиль линии на том же участке изображения.

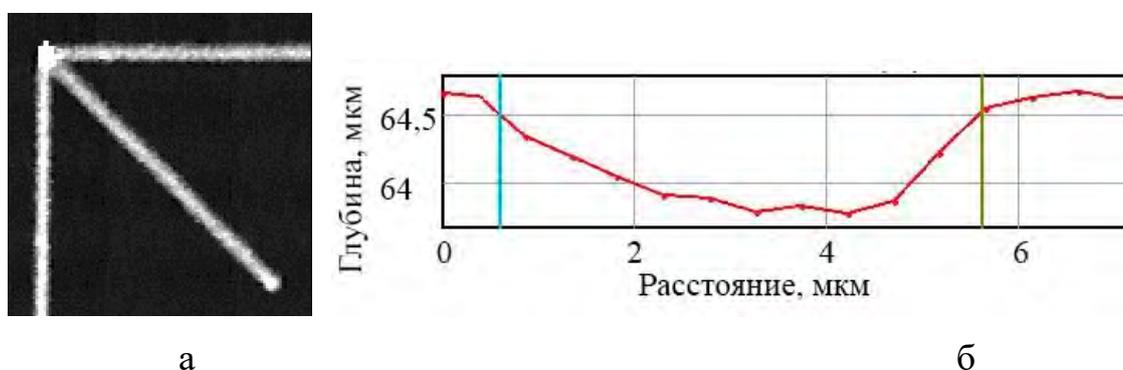


Рисунок 2.4 Изображения (а) фрагмент профилограммы калибровочной сетки и (б) профиля глубины линии (шаг дискретизации по X, Y – 250 нм)

Как видно из рисунков, применение профилометра позволяет провести регистрацию траектории лазерного пучка существенно точнее, чем при использовании камеры. При этом измерение точечным сенсором исключает возможность внесения дополнительных погрешностей оптическими элементами системы технического зрения (как освещающей, так и приемной частей).

2.1.2 Анализ изображений калибровочных объектов

В качестве калибровочного объекта выбрана прямоугольная равномерная сетка из вертикальных и горизонтальных линий. Профилограмму (карту высот) калибровочного объекта для поиска реперных точек удобнее всего представлять в виде двумерного полутонового изображения, на котором интенсивность соответствует глубине. Известен ряд методов поиска координат узлов сетки для калибровки оптического тракта измерительных систем на основе видеокамер [112, 113], основанные на применении стандартных алгоритмов: преобразования Хафа, детектора углов Харриса. Однако их применение для реальных топологических карт калибровочных объектов, содержащих дефекты в виде микроцарапин, и с шумами края линии на уровне 10% приводит к большому количеству ошибок при определении координат узлов. Получить требуемую точность с учетом указанных выше особенностей изображений удалось, используя следующую двухшаговую процедуру.

На первом шаге процедуры, выполняемом в три этапа, используется модифицированная версия алгоритма поиска узлов сетки, рассмотренного в [114], в силу его робастности к цифровым шумам изображения и дефектам поверхности образцов типа царапин. В данном алгоритме суммируется значение интенсивности на изображении вдоль осей Oy и Ox для каждой строки и столбца. Введем следующие обозначения: $Int(x, y)$ – интенсивность в точке (x, y) изображения, W – ширина изображения, H – его высота, N_x и N_y – количество узлов сетки по осям Ox и Oy , соответственно.

На первом шаге вычисляются значения вспомогательных функций $A_v(x)$, $A_h(y)$, которые при каждом значении x и y представляют собой среднее значение интенсивности вдоль соответствующего столбца и строки изображения:

$$A_v(x) = \sum_{y=1}^H Int(x, y)/H; A_h(y) = \sum_{x=1}^W Int(x, y)/W.$$

Предполагается, что на графиках функций $A_v(x)$, $A_h(y)$ будет соответственно N_x и N_y ярко выраженных пиков, каждый из которых соответствует определенному столбцу

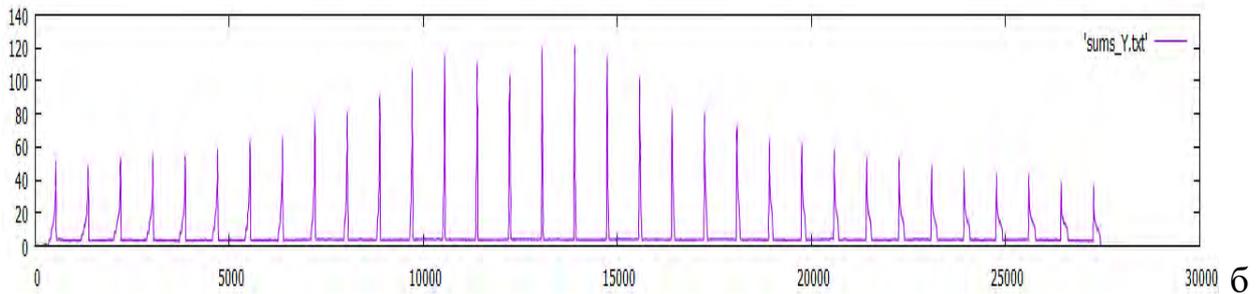


Рисунок 2.5а) и строке (рисунок

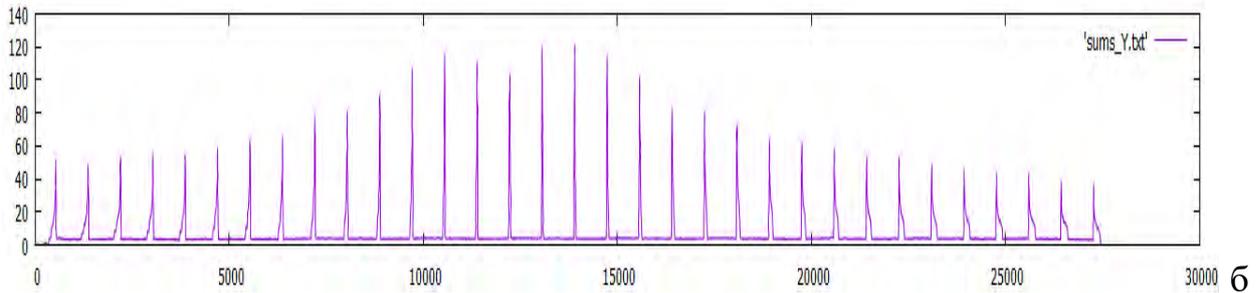


Рисунок 2.5б) на искомой сетке (для сетки, показанной на рисунке 2.2).

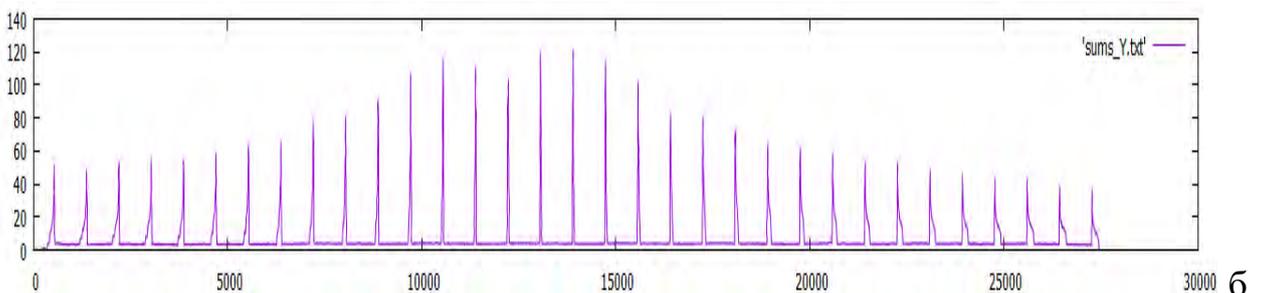
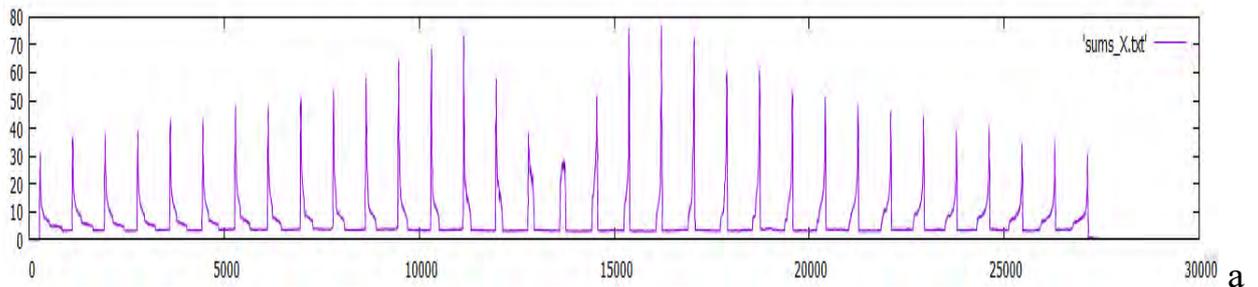


Рисунок 2.5 Результат работы первого этапа процедуры поиска узлов сетки
В данном примере количество пиков $N_x = N_y = 33$.

Если обозначить координаты найденных пиков горизонтальных через \bar{x}_a^i , $i = 1, \dots, N_x$, и y_j , $j = 1, \dots, N_y$, то, в качестве приближения для узлов сетки можно взять точки с координатами $(\bar{x}_a^{ij}, \bar{y}_a^{ij})$. Обозначим через i_c индекс центральной горизонтальной линии сетки, а через j_c – индекс центральной вертикальной линии. Обозначим горизонтальный размер ячейки сетки как $w = |\bar{x}_a^{(i_c)(j_c+1)} - \bar{x}_a^{(i_c)(j_c)}|$, а вертикальный как $h = |x_{(i_c+1)(j_c)} - x_{(i_c)(j_c)}|$.

На втором этапе для каждого j , $j = 1, \dots, N_x$, вычисляются значения функции $A_h^j(y)$, $y \in [0, H]$, которая определяется формулой:

$$A_h^j(y) = \sum_{x=\bar{x}_a^{ij}-\frac{w}{2}}^{\bar{x}_a^{ij}+\frac{w}{2}} \text{Int}(x, y) / w. \quad (2.1)$$

Поскольку на данном этапе работы алгоритма значения x_{ij} совпадают для каждого столбца, в качестве индекса i можно взять произвольное целое значение в диапазоне от 1 до N_y . Затем, для каждого j находятся N_y пиков на графике функции $A_h^j(y)$. После этого, для каждой точки $(\bar{x}_a^{ij}, \bar{y}_a^{ij})$ значение \bar{y}_a^{ij} заменяется на координату соответствующего максимума на графике функции $A_h^j(y)$.

На третьем шаге для всех $i = 1, \dots, N_y$, $j = 1, \dots, N_x$, сначала вычисляются значения функции:

$$A_v^{ij}(x) = \sum_{y=\bar{y}_a^{ij}-h/2}^{\bar{y}_a^{ij}+h/2} \text{Int}(x, y), x \in [\bar{x}_a^{ij} - w/2, \bar{x}_a^{ij} + w/2]. \quad (2.2)$$

Затем для каждой функции $A_v^{ij}(x)$ находится значение x , в котором функция достигает максимума, и значение для каждой точки $(\bar{x}_a^{ij}, \bar{y}_a^{ij})$ значение \bar{x}_a^{ij} заменяется на вновь найденное.

Найденные таким образом координаты максимумов суммарной интенсивности по строкам и по столбцам полагаются соответствующими координатам узлов, обозначаемым далее как $(\bar{x}_a^{ij}, \bar{y}_a^{ij})$ (где i, j – порядковые номера узла по вертикали и горизонтали). Эксперименты показали, что найденные на

данном этапе координаты отклоняются от реальных позиций не более чем на 10% от ширины ячейки сетки.

Второй этап процедуры состоит в применении метода кросс-корреляции с использованием найденных координат $(\bar{x}_a^{ij}, \bar{y}_a^{ij})$. Изображение калибровочного объекта разбивается на фрагменты размерами $w = \alpha \cdot |\bar{x}_a^{(i_c)(j_c+1)} - \bar{x}_a^{(i_c)(j_c)}|$, $h = \alpha \cdot |\bar{y}_a^{(i_c+1)(j_c)} - \bar{y}_a^{(i_c)(j_c)}|$, где $\alpha \in (0,1]$ – вещественный параметр (в экспериментах обычно использовалось значение $\alpha = 0,5$) с центрами в точках $(\bar{x}_a^{ij}, \bar{y}_a^{ij})$. Для фрагмента изображения – I , содержащего искомый узел, и изображения-шаблона данного узла – T вычисляются значения нормированной кросс-корреляции R по формуле:

$$R(u, v) = \frac{\sum_{u', v'} (T(u', v') \cdot I(u+u', v+v'))}{\sqrt{\sum_{u', v'} T(u', v')^2 \cdot \sum_{u', v'} I(u+u', v+v')^2}}$$

где (u, v) - всевозможные положения шаблона T относительно фрагмента I . По значениям u и v , при которых функция $R(u, v)$ достигает максимума, рассчитывается точное положение узла сетки $\bar{x}_{s_c}^{ij}, \bar{y}_{s_c}^{ij}$ на карте. При этом, точность при нахождении узла сетки зависит от схожести шаблона с фрагментом. Поэтому, шаблон формируется по фрагменту I , с учетом толщины линий сетки и углы их наклона к координатным осям. Приближенное значение угла наклона φ горизонтальной линии к оси Ox в окрестности узла сетки i, j , определяется как:

$$\varphi = \arctg \frac{\bar{y}_a^{(i)(j+1)} - \bar{y}_a^{ij}}{\bar{x}_a^{(i)(j+1)} - \bar{x}_a^{ij}}$$

Ширина линий (вертикальной и горизонтальной) для каждого фрагмента определяется с использованием модифицированной версии алгоритма, разработанного для обнаружения контуров структур, сформированных при лазерной микрообработке [115]. Для определения ширины вертикальной линии сначала вычисляется значения функции $A_v^{ij}(x)$ по формуле (2.2). Далее, осуществляется свертка полученной функции с одномерным гауссовским ядром, функцию-результат которой обозначим как $\tilde{A}_v^{ij}(x)$. Продифференцировав численно

функцию $\tilde{A}_v^{ij}(x)$ (например, используя формулу центральной разности) можно обнаружить 2 пика на графике ее производной функции. Тогда ширина вертикальной линии на изображении можно определить как модуль разности координат найденных пиков. Определение ширины горизонтальной линии осуществляется аналогично с использованием формулы (2.1), за исключением того, что суммирование интенсивности осуществляется вдоль прямых, наклон которых был определен выше. Для некоторых изображений, перед тем как вычислять значения функции $A_v^{ij}(x)$, имеет смысл произвести предварительную обработку с глобальным порогом, например, определяемый с помощью алгоритма Оцу [116].

На рисунке 2.6а представлено изображение фрагмента реальной калибровочной карты объекта I, содержащего узел, и изображение-шаблон T, рассчитанный по указанному алгоритму; на рисунках 2.6б – 2.6г – «тепловые карты» кросскорреляционной функции для данного фрагмента с различными вариантами построения шаблона.

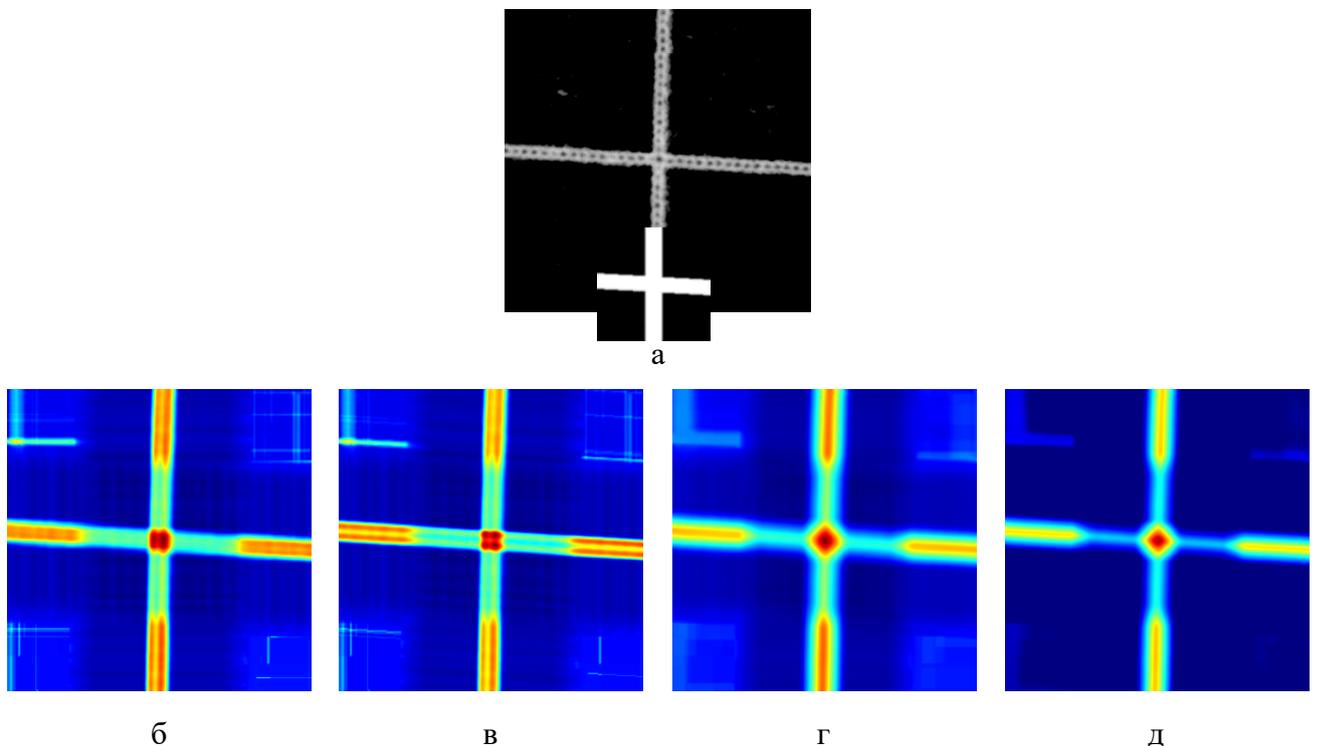


Рисунок 2.6 Иллюстрация работы кросскорреляционного алгоритма: исходное изображение узла калибровочной сетки и его шаблона T (а) и результаты применения кросскорреляционной функции с шаблонами,

построенными без учета наклона и ширины линий (б), с учетом только наклона линий (в), только ширины линий (г), наклона и ширины линий (д).

Из рисунка 2.6 видно, что наилучшие с практической точки зрения результаты получаются при учете обоих параметров (рисунок 2.6д), поскольку в этом случае кросскорреляционная функция имеет единственный ярко выраженный максимум с наименьшей площадью пика.

2.1.3 Расчет таблицы смещения координат узлов

Как было сказано ранее в главе 1, смещения измеренных координат узлов калибровочной сетки относительно заданных определяются как разность: $\Delta x_{s_c}^{i,j} = \bar{x}_{s_c}^{i,j} - x_{s_c}^{i,j}$, $\Delta y_{s_c}^{i,j} = \bar{y}_{s_c}^{i,j} - y_{s_c}^{i,j}$, где $x_{s_c}^{i,j}$, $y_{s_c}^{i,j}$ – координаты узлов «идеальной сетки».

В процессе построения «идеальной сетки» вначале определяется направление ее главных осей. Прямая l_1 , задающая горизонтальную ось «идеальной сетки», определяется методом наименьших квадратов, примененным к точкам центральной строки найденной сетки. Прямая l_2 , задающая вертикальную ось «идеальной сетки» определяется как прямая, перпендикулярная прямой l_1 , которая проходит через центральный узел найденной сетки. Направляющий единичный вектор прямой l_1 обозначим через e_1 и выберем его таким образом, чтобы первая его координата была положительна. Направляющий единичный вектор прямой l_2 обозначим через e_2 и выберем его так, чтобы вторая его координата была отрицательна. Введем обозначения: $p_{ij} = (\bar{x}_{s_c}^{ij}, \bar{y}_{s_c}^{ij})$, i_c – индекс центральной строки, j_c – индекс центрального столбца, $|\cdot|$ – евклидова норма вектора. Шаг идеальной сетки s_x и s_y по осям x и y (размеры ячейки) определяется как $s_x = \sum_{j=2}^{N_x-2} |p_{(i_c)(j+1)} - p_{(i_c)(j)}| / (N_x - 3)$ и $s_y = \sum_{i=2}^{N_y-2} |p_{(i+1)(j_c)} - p_{(i)(j_c)}| / (N_y - 3)$ соответственно. В данных формулах не фигурируют крайние узлы сетки, поскольку предполагается, что позиции именно этих узлов наиболее искажены относительно идеальной сетки. После того как вычислен шаг идеальной сетки, строится сама идеальная сетка. Позиции узлов идеальной сетки q_{ij} , $i = 1, \dots, N_y$, $j = 1, \dots, N_x$, вычисляются по формуле:

$$q_{ij} = p_{(i_c)(j_c)} + e_1(s_x \cdot (j - j_c)) + e_2(s_y \cdot (i - i_c)).$$

На основе предложенной двухшаговой процедуры разработано специальное программное обеспечение ScanCorrection, предназначенное для поиска таблицы корректирующих значений для сканирующей лазерной системы по файлу изображения калибровочной сетки [33]. Для проверки точности работы предложенного метода были синтезированы изображения калибровочной сетки из 33x33 линий с шириной от 10 до 30 пикселей и шагом 10^3 пикселей, повернутые на угол 0° , $-0,1^\circ$, $0,5^\circ$; а также с внесенным 10% искажением типа «бочка» с углами поворота также 0° , $-0,1^\circ$, $0,5^\circ$. Оценки результатов измерений изображений представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

	Идеальный квадрат					«Бочка»		
W, пикс.	10	20	30	20	20	20	20	20
$\theta_{уст}, ^\circ$	0	0	0	-0,1	0,5	0	-0,1	0,5
$\theta_{изм}, ^\circ$	0	0	0	-0,0999	0,499	0	-0,0999	0,498
σ_x	0,504	0,39	0,39	0,54	0,949	0,543	0,539	0,684
σ_y	0,504	0,478	0,39	0,491	0,427	0,532	0,453	0,462
$ \Delta x_{max} $	1,831	0,916	0,916	1,373	2,747	2,345	2,503	3,007
$ \Delta y_{max} $	1,831	0,916	0,916	1,373	1,373	2,306	1,924	2,368

Для найденных координат узлов среднеквадратическое отклонение от заданных значений не превысило 0,684 пикселя, а модуль максимальных значений ошибок – 2,5 пикселя.

2.1.4 Разработка алгоритма расчета, ориентированного на быструю аппаратно-программную коррекцию с помощью встраиваемых систем управления

Для современных гальванометрических сканирующих систем необходимо формировать входные воздействия с частотой до 100 кГц [19]. Рассмотренные в первой главе алгоритмы коррекции, основанные на полиномиальном приближении, требуют большого количества вычислений и, соответственно, аппаратных ресурсов, что ограничивает их использование пост-процессорами,

исполняемыми на ЭВМ. При создании встроенных решений на основе микроконтроллеров или ПЛИС можно использовать менее требовательные к вычислительной мощности алгоритмы билинейной интерполяции, однако и в этом случае для вычисления каждой пары корректирующих значений $\Delta x_s, \Delta y_s$, необходимо выполнять шесть ресурсоемких операций деления с плавающей запятой. Для обеспечения высокой скорости вычислений при компактной аппаратной реализации на микроконтроллерах или ПЛИС предложен следующий алгоритм кусочно-планарной интерполяции. Скорректированные управляющие воздействия \hat{x}_s, \hat{y}_s рассчитываются как сумма: $\hat{x}_s = x_s + \Delta x_s, \hat{y}_s = y_s + \Delta y_s$. Величины смещений управляющих воздействий $\Delta x_{s_c}^{ij}, \Delta y_{s_c}^{ij}$ в координатах, соответствующих узлам сетки определяются как: $\Delta x_{s_c}^{ij} = k_{sx} \cdot \Delta x_{s_c}^{ij}, \Delta y_{s_c}^{ij} = k_{sy} \cdot \Delta y_{s_c}^{ij}$ где, k_{sx}, k_{sy} – коэффициенты пропорциональности для перехода между системами координат изображения и управляющих воздействий дефлекторов.

Расчет смещений $\Delta x_s, \Delta y_s$ во всех остальных точках, лежащих внутри области, выполняется методом кусочно-планарной интерполяции по найденной таблице значений смещений $\Delta x_{s_c}^{ij}, \Delta y_{s_c}^{ij}$ в узлах сетки следующим образом (рисунок Рисунок 2.7).

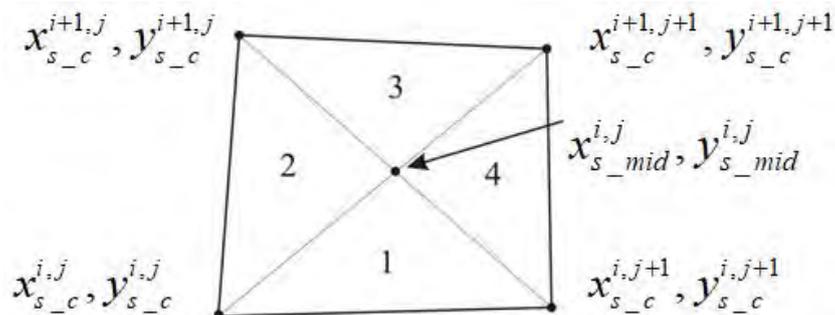


Рисунок 2.7 Иллюстрация алгоритма вычисления смещений $\Delta x_s, \Delta y_s$ внутри четырехугольника с узлами сетки в вершинах

Для каждой области вычисляются корректирующие значения в средней точке $x_{s_c}^{ij}, y_{s_c}^{ij}$:

$$\Delta x_{s_c}^{ij} = (\Delta x_{s_c}^{ij} + \Delta x_{s_c}^{i+1,j} + \Delta x_{s_c}^{i,j+1} + \Delta x_{s_c}^{i+1,j+1})/4,$$

$$\Delta y_{s_c}^{ij} = (\Delta y_{s_c}^{ij} + \Delta y_{s_c}^{i+1,j} + \Delta y_{s_c}^{i,j+1} + \Delta y_{s_c}^{i+1,j+1})/4.$$

Обозначим D – шаг линий сетки ($D = \frac{x_{max} - x_{min}}{N_x - 1}$, считая, что $N_x = N_y$), и $x_s^q = \frac{x_s}{N_x - 1}$, $y_s^q = \frac{y_s}{N_y - 1}$ – значения координат внутри четырехугольника, а также вспомогательные переменные $A = D - x_s^q + y_s^q$ и $B = x_s^q - y_s^q$. Тогда расчет скорректированных значений $\Delta x_s, \Delta y_s$ для каждого из четырех секторов области происходит по соответствующей формуле:

1.
$$\Delta x_s = A \times \Delta x_{s_c}^{ij} + B \times \Delta x_{s_c}^{i+1,j} + \Delta x_{s_{mid}}^{ij} \times 2y_s^q,$$

$$\Delta y_s = A \times \Delta y_{s_c}^{ij} + B \times \Delta y_{s_c}^{i+1,j} + \Delta y_{s_{mid}}^{ij} \times 2y_s^q,$$
2.
$$\Delta x_s = A \times \Delta x_{s_c}^{ij} - B \times \Delta x_{s_c}^{i,j+1} + \Delta x_{s_{mid}}^{ij} \times 2x_s^q,$$

$$\Delta y_s = A \times \Delta y_{s_c}^{ij} - B \times \Delta y_{s_c}^{i,j+1} + \Delta y_{s_{mid}}^{ij} \times 2x_s^q,$$
3.
$$\Delta x_s = -A \times \Delta x_{s_c}^{i+1,j+1} + B \times \Delta x_{s_c}^{i+1,j} + \Delta x_{s_{mid}}^{ij} \times 2(D - x_s^q),$$

$$\Delta y_s = -A \times \Delta y_{s_c}^{i+1,j+1} + B \times \Delta y_{s_c}^{i+1,j} + \Delta y_{s_{mid}}^{ij} \times 2(D - x_s^q),$$
4.
$$\Delta x_s = -A \times \Delta x_{s_c}^{i+1,j+1} - B \times \Delta x_{s_c}^{i,j+1} + \Delta x_{s_{mid}}^{ij} \times 2(D - y_s^q),$$

$$\Delta y_s = -A \times \Delta y_{s_c}^{i+1,j+1} - B \times \Delta y_{s_c}^{i,j+1} + \Delta y_{s_{mid}}^{ij} \times 2(D - y_s^q),$$

Все вычисления могут быть выполнены с использованием только действий сложения и умножения двоичной целочисленной арифметики (при условии, что N_x и N_y имеют значение $2^k + 1$). По сравнению с рассмотренными методами билинейной интерполяции, использующими деление, это обеспечивает как минимум на порядок более высокую производительность при реализации на микроконтроллерах, а также компактность при реализации на ПЛИС. Так для микроконтроллера семейства F28x компании Texas Instruments выполнение деления с плавающей запятой занимает минимум 5 тактов, а сложение и умножение – 1 такт [117], то при использовании предложенного алгоритма вычислений производительность вырастет как минимум в 5 раз. При реализации на ПЛИС компании Intel один модуль деления чисел с плавающей запятой одинарной точности использует минимум ~200 ALM, 16 DSP блоков и выполняется минимум 6 тактов [118], против ~1600 ALM, 2 DSP блоков и 13 тактов при реализации всего предложенного алгоритма, т.е. будет задействовано на порядок меньше

аппаратных ресурсов. Недостатком предложенного метода является то, что для интерполяции используется линейное приближение, однако преобразование F_{xy} заведомо нелинейно, поэтому найденные $\Delta x_{s-c}^{ij}, \Delta y_{s-c}^{ij}$ по-прежнему могут больше заданной ошибки позиционирования δ . Для уменьшения величины смещений предложено выполнять несколько последовательных итераций рассмотренной выше процедуры коррекции. В этом случае в качестве приближения искомых управляющих воздействий \hat{x}_s, \hat{y}_s рассматриваются последовательности чисел $\hat{x}_{s,k}, \hat{y}_{s,k}$, определяемые рекуррентными соотношениями:

$$\hat{x}_{s,k} = \hat{x}_{s,(k-1)} + \Delta x_{s,k}, \hat{y}_{s,k} = \hat{y}_{s,(k-1)} + \Delta y_{s,k}; \hat{x}_{s,0} = x_s; \hat{y}_{s,0} = y_s$$

Дополнительные итерации расчета корректирующих значений благодаря быстрдействию предложенного алгоритма и компактности его реализации также не требуют больших вычислительных и аппаратных ресурсов.

2.1.5 Экспериментальная проверка предложенного метода калибровки

Экспериментальная проверка проводилась с использованием разработанной в ИАиЭ СО РАН рабочей станции на основе фемтосекундного лазера [119] с комплементарной системой позиционирования со следующими техническими характеристиками:

- поле записи объективов сканирующего модуля $6 \times 6 \text{ мм}^2$ и $21 \times 21 \text{ мм}^2$;
- минимальная ширина гравированной линии 3 мкм;
- общий размер зоны обработки $200 \times 200 \times 100 \text{ мм}^3$, дискретность перемещения 50 нм, точность $\pm 0,6 \text{ мкм}$, воспроизводимость $\pm 0,25 \text{ мкм}$.

В качестве калибровочного объекта использовались сетки размером 17×17 и 33×33 . Распределение смещений для каждой из осей позиционирования пучка X и Y для объектива с полем $6 \times 6 \text{ мм}^2$ до и после применения одной итерации коррекции показано на рисунке 2.8.

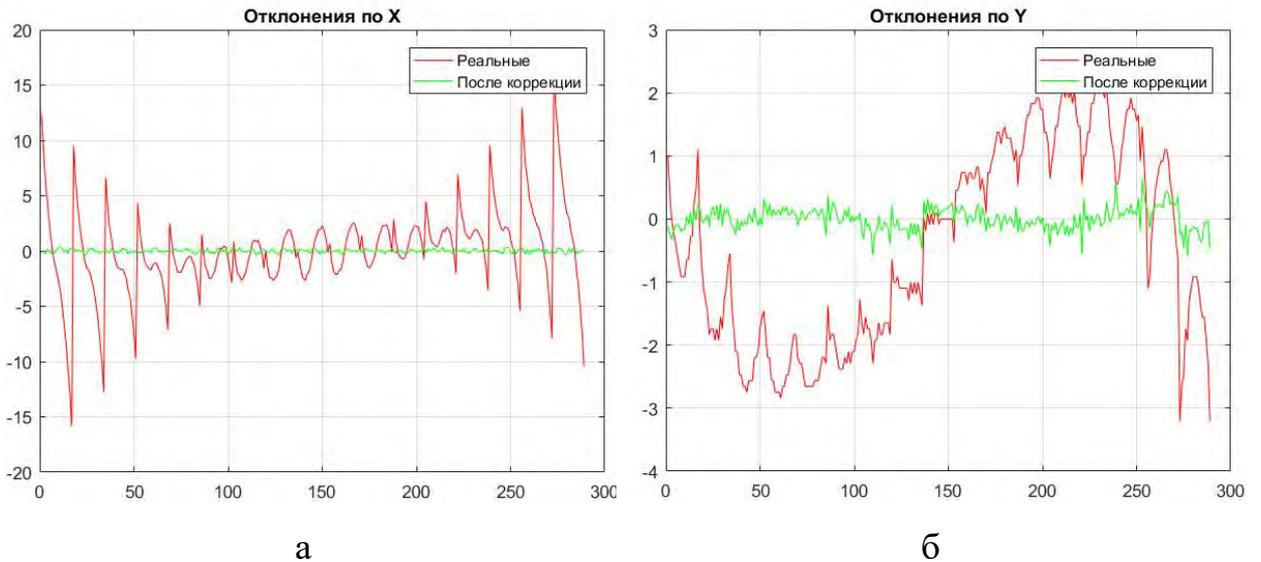


Рисунок 2.8 Распределение смещений узлов $\Delta x_{s_c}^{ij}, \Delta y_{s_c}^{ij}$ до и после коррекции для сетки 17x17 для объектива сканирующего модуля с полем 6x6 мм², по горизонтальной оси расположены порядковые номера узлов (всего 289), по вертикальной – смещение в микронах: (а) для оси X, (б) для оси Y

Различия в амплитуде смещений по разным осям объясняются тем, что зеркало Y расположено первым по ходу лазерного пучка и его поворот вносит меньшие искажения. Результаты оценки смещений $\Delta x_{s_c}^{ij}, \Delta y_{s_c}^{ij}$ в узлах сетки до (столбец Исх) и после калибровки с применением одной (столбец $K_{и1}$) и двух (столбец $K_{и2}$) итераций коррекции представлены в таблице 2.2 (σ_x и σ_y – среднее квадратическое величин $\Delta x_{s_c}^{ij}, \Delta y_{s_c}^{ij}$ соответственно).

Таблица 2.2

	Поле 6x6 мм		Поле 21x21 мм		
	Исх.	$K_{и1}$	Исх.	$K_{и1}$	$K_{и2}$
σ_x	3,8748	0,380	17,403	3,599	1,307
σ_y	1,6051	0,376	50,467	1,896	1,236
$\max_{i,j} \Delta x_{s_c}^{ij} $	16,0217	1,099	86,859	9,469	4,245
$\max_{i,j} \Delta y_{s_c}^{ij} $	3,2043	1,099	181,229	6,857	3,919

Видно, что применение одноступенчатой коррекции обеспечивает уменьшение $\Delta x_{s_c}^{ij}$, $\Delta y_{s_c}^{ij}$ в несколько раз по сравнению с исходными значениями. Применение второй итерации коррекции ($K_{и2}$) для системы с полем записи 21x21 мм позволяет дополнительно уменьшить отклонения в 2 раза.

Для определения угла поворота системы координат сканирующего модуля относительно электромеханических приводов и его последующей программной коррекции использовался тест совмещения в виде вертикальных и горизонтальных линий длиной, равной половине размера поля обработки объектива, схема выполнения которого показана на рисунке 2.9.

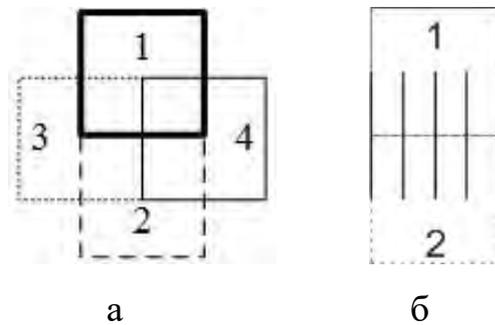


Рисунок 2.9 Схема теста совмещения полей обработки лазерной системы. При выполнении теста тестовый объект перемещается относительно сканирующего модуля по схеме, показанной на рисунке 2.9а (положение поля обработки показано разным типом линии). В позициях 1 и 2 на поверхность тест-объекта наносятся вертикальные линии (рисунок 2.9б), в позициях 3 и 4 – горизонтальные. Совмещение систем координат по углу выполняется программным поворотом тестового изображения. На рисунке 2.10а представлена профилограмма теста совмещения соседних полей размером 5x5 мм², и увеличенные фрагменты (размером 50 мкм) вертикального (рисунок 2.10б) и горизонтального (рисунок 2.10в) стыков линий на краях поля обработки сканирующего модуля.

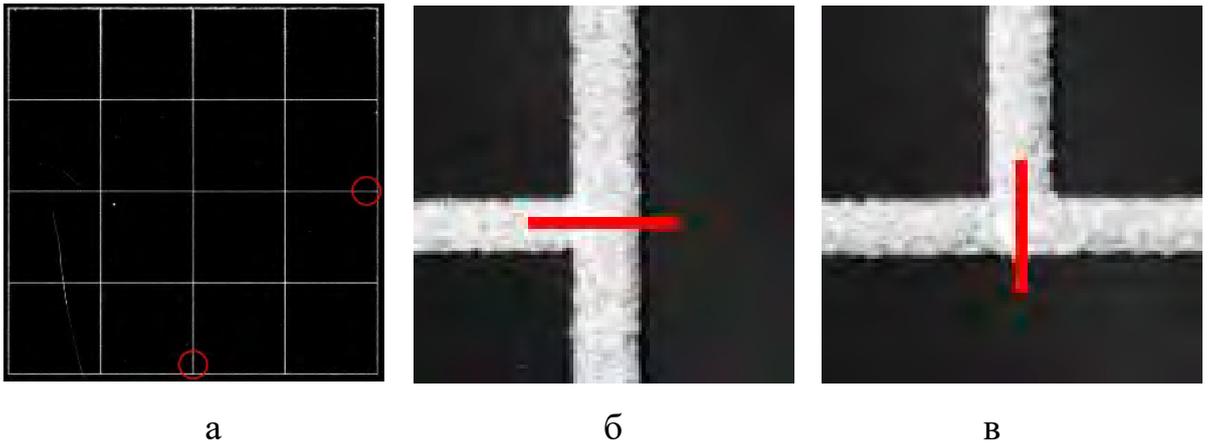


Рисунок 2.10 Тест совмещения полей записи лазерной системы
размером 5×5 мм², ширина линии 5 мкм

Данный тест также позволяет оценить ошибку стыковки соседних полей записи сканирующего модуля, и, соответственно, качество его калибровки. Анализ изображения показывает визуальное отсутствие «ступеньки» на границах линий (на рисунках 2.10б и 2.10в обозначены красными полосами), нанесенных в разных полях обработки, что говорит о коррекции статических искажений на краях поля обработки сканирующей системы с ошибкой менее 1 мкм.

2.2 Алгоритм компенсации динамических ошибок позиционирования электромеханических приводов «высокоинерционного» сканера с помощью «низкоинерционного» сканера в комплементарных системах позиционирования

Как было ранее показано в главе 1, при позиционировании электромеханических приводов «высокоинерционного» сканера могут возникать колебания длительностью до сотен микросекунд, которые приводят к ошибкам обработки. Сохранение заданной точности позиционирования лазерного пучка в этом случае возможно при использовании временных задержек после выхода электромеханических приводов в позицию либо при значительном уменьшении скорости их перемещения. При амплитудах колебания «высокоинерционного» сканера менее размера поля обработки «низкоинерционного» для уменьшения временных потерь предложено начинать обработку непосредственно после осуществления перемещения «высокоинерционного» сканера, а ошибки позиционирования лазерного пучка, возникающие в результате колебаний его приводов компенсировать по сигналам от их датчиков положения с помощью «низкоинерционного» сканера [23, 24]. Схема управления комплементарной системой позиционирования в этом случае будет иметь следующий вид (рисунок 2.11).

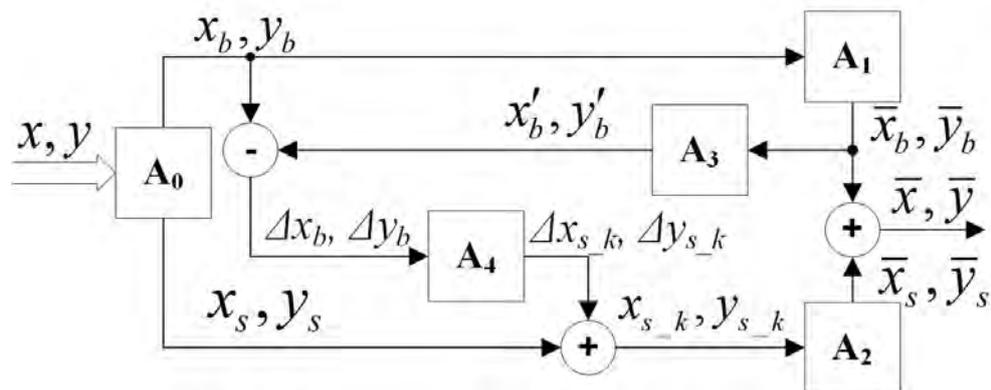


Рисунок 2.11 Схема компенсации колебаний «высокоинерционного» сканера с помощью «низкоинерционного» сканера

Координаты перемещения лазерного пучка по поверхности обрабатываемого изделия x, y разделяются на два потока: x_b, y_b (позиция «высокоинерционного» сканера A_1) и x_s, y_s (положение лазерного пучка в координатах

«низкоинерционного» сканера A_2) такие, чтобы $x = x_b + x_s$, $y = y_b + y_s$. По сигналам x'_b , y'_b с датчиков положения A_3 «высокоинерционного» сканера рассчитывается текущее смещение «низкоинерционного» сканера относительно заданной позиции: $\Delta x_b = x_b - x'_b$, $\Delta y_b = y_b - y'_b$. Найденное смещение преобразуется блоком A_4 в корректирующие значения $\Delta x_{s,k}$, $\Delta y_{s,k}$, которые после сложения с x_s , y_s поступают на вход управления «низкоинерционного» сканера.

Для определения функции корректирующего блока A_4 и его параметров предложено использовать математическую модель «низкоинерционного» сканера. Рассмотрев различные подходы к моделированию, предложенные в работах [120-124], представим управляющее устройство гальванометрического дефлектором (драйвер) в следующем виде (рисунок 2.12).

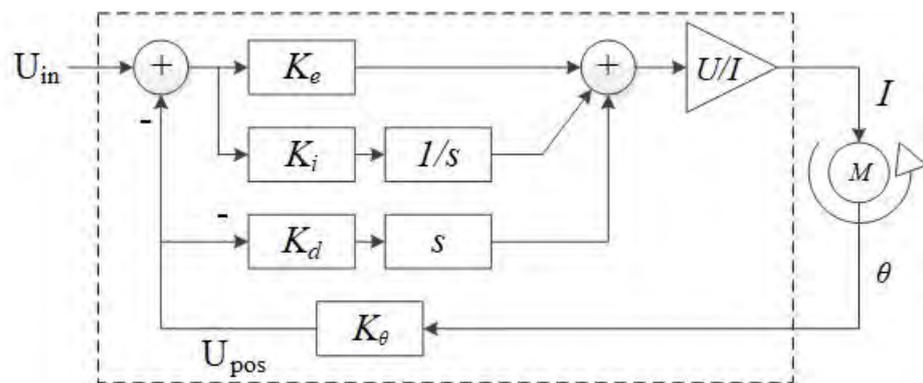


Рисунок 2.12 Структура драйвера гальванометрического дефлектора [120]

На рисунке 2.12 пунктирной рамкой обозначен драйвер дефлектора, на вход которого подается управляющее напряжение U_{in} преобразуемое в выходной ток I . Ротор дефлектора M отклоняется на угол θ , который измеряется с помощью встроенного в дефлектор датчика поворота и преобразуется в напряжение обратной связи U_{pos} , пропорциональное измеренному отклонению.

Передаточная функция дефлектора M имеет следующий вид:

$$\frac{\theta}{I} = \frac{K}{Js^2 + Ds}$$

где K – коэффициент пропорциональности преобразования тока в момент двигателя (принимается допущение, что момент на валу пропорционален току), D – демпфирующая константа (для рассматриваемых дефлекторов с постоянным

магнитом пренебрежимо мала), J – суммарный момент инерции ротора J_r и зеркала J_m . Передаточную функцию гальванометрического дефлектора с драйвером можно выразить следующим образом:

$$\frac{U_{pos}}{U_{in}} = \frac{KK_{\theta}K_e s + KK_{\theta}K_i}{Js^3 + (D + KK_{\theta}K_d)s^2 + (KK_{\theta}K_e)s + KK_{\theta}K_i},$$

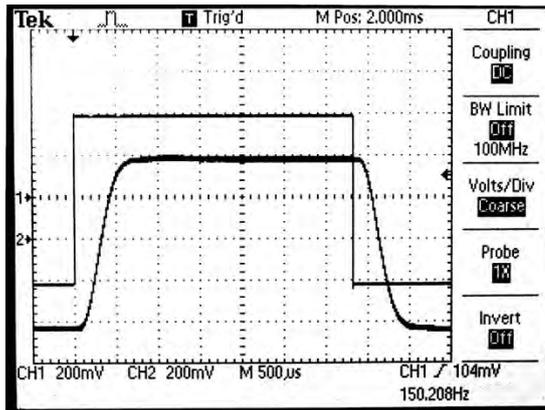
где K_e – коэффициент усиления драйвера, K_d – коэффициент демпфирования (или передачи дифференциального звена), K_i – коэффициент передачи интегрирующего звена, K_{θ} масштабный коэффициент преобразования датчика положения.

Интегральная составляющая K_i , в уравнении позволяет уменьшить погрешность до нуля для постоянного сигнала на входе, однако создает постоянную задержку для входного сигнала. Коэффициент усиления K_e увеличивает скорость отклика системы, а K_d регулирует коэффициент демпфирования. На практике (например, в драйверах 678x, 671x компании «Cambridge Technology» [125]) чаще всего используется схема управления гальванометрическим дефлекторов, содержащая только пропорциональное и дифференциальное звенья, что позволяет достигать более высоких скоростей перемещения. При этом выражение упрощается до второго порядка:

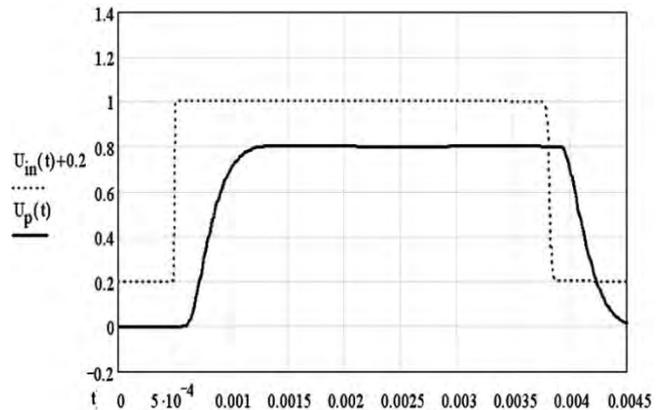
$$\frac{U_{pos}}{U_{in}} = \frac{KK_{\theta}K_e}{Js^2 + (KK_{\theta}K_d)s + KK_{\theta}K_e}.$$

Используя данное выражение можно смоделировать поведение системы с различными вариантами нагрузки, параметрами дефлекторов и настройками драйверов.

Тестирование модели проводилось для сканирующей системы «Cambridge Technology» драйвер 678x + дефлектор 6220 [126] со следующими параметрами настройки: $J_r = 0,125 \cdot 10^{-7}$ кг·м², $J_m = 0,117 \cdot 10^{-7}$ кг·м², $K = 6,17 \cdot 10^{-3}$ Н·м/А, $K_e = 42,5$ А/В, $K_{\theta} = 0,5 \cdot \pi/180$ В/рад, $K_d = 0,81 \cdot 10^{-4}$. На рисунке 2.13а приведена осциллограмма реакции системы на ступенчатое воздействие $U_{in} = 0,8$ В, полученная экспериментальным путем (изменением напряжения на выходе цепи усиления датчика положения ротора дефлектора), рисунке 2.13б – смоделированная реакция сканера.



а



б

Рисунок 2.13 Реакция сканирующей системы драйвер + дефлектор на ступенчатое воздействие: (а) реальная, (б) смоделированная

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов показало, что максимальная разница между расчетными и экспериментальными данными составляет не более 5%.

Поскольку компенсация колебаний «высокоинерционного» сканера может выполняться для каждого из его приводов независимо (за счет наличия датчиков положения), то моделирование выполнялось только для одной координаты системы «драйвер+дефлектор». Также были приняты следующие допущения:

- угол между осями координат «высокоинерционного» и «низкоинерционного» сканеров составляет доли градусов и может не учитываться;
- задержка получения данных о реальном положении «высокоинерционного» сканера и время расчета значений Δx_{s_k} , Δy_{s_k} корректирующим блоком A_4 много меньше постоянной времени системы «драйвер+дефлектор»;
- погрешность датчиков положения «высокоинерционного» сканера считается бесконечно малой относительно погрешности его позиционирования

При моделировании были взяты следующие параметры системы: частота выдачи сигналов на сканер – 10 кГц, задержка передачи сигнала на сканер – 10 мкс. В качестве сигнала рассогласования положения привода «высокоинерционного» сканера Δx_b принята аппроксимация в виде затухающего гармонического процесса $\Delta x_b(t) = A \cdot e^{at} \cdot \sin(2\pi\omega t)$ (на примере координаты x_b) со следующими параметрами $A = 0,21$; $a = -0,03 \cdot 10^3$; $\omega = 54$ и $\omega = 100$. Для удобства

визуального представления результатов моделирования заданная позиция «высокоинерционного» сканера принята равной 0 ($x_b = 0, y_b = 0$), тогда позиция лазерного пучка в поле обработки будет определяться как $x = x_s, y = y_s$.

На рисунке 2.14 приведены результаты моделирования ошибки положения лазерного пучка с пропорциональным корректирующим звеном в качестве блока A_4 .

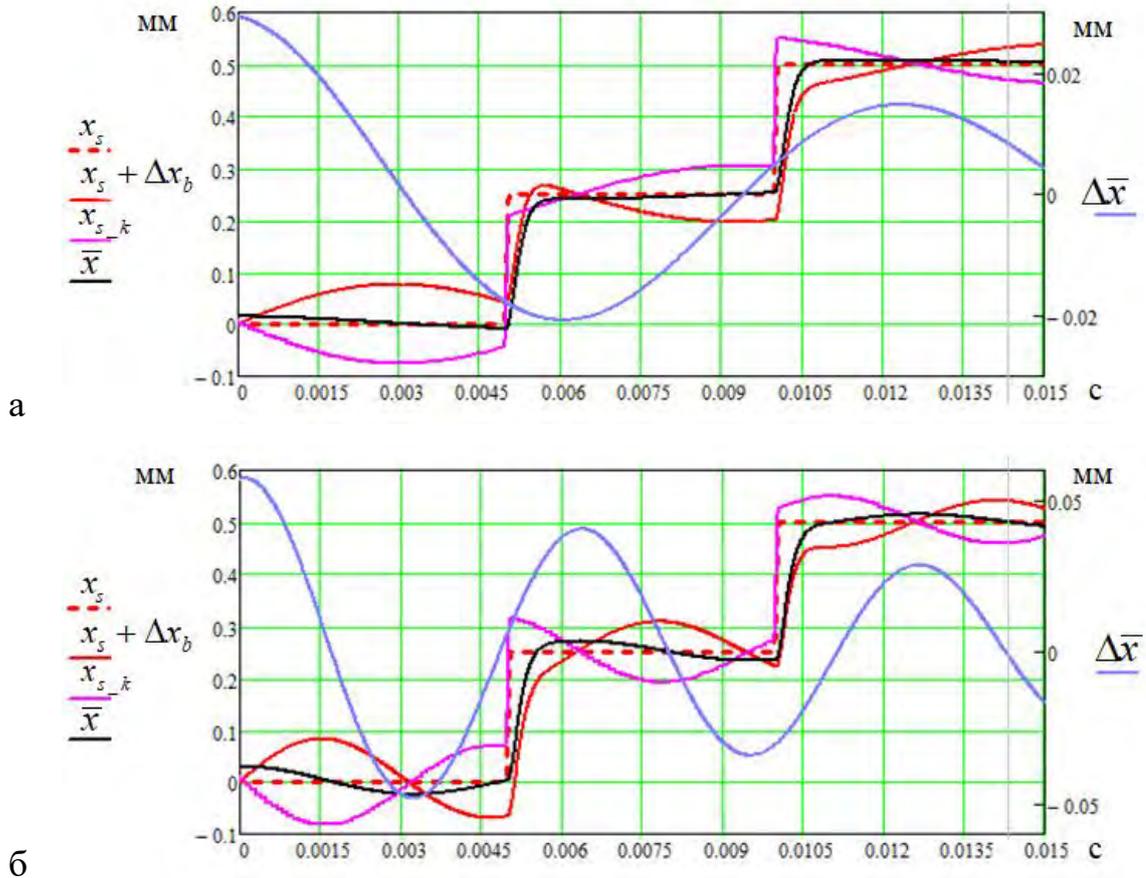


Рисунок 2.14 Ошибка позиционирования лазерного пучка при использовании пропорционального корректирующего звена ($k_p = 1$) в качестве блока A_4 : (а) для $\omega = 54$, (б) $\omega = 100$

Как видно из графиков при таком варианте коррекции погрешность $\Delta \bar{x}$ растет с увеличением частоты с 20 мкм при частоте колебаний подвижной части «высокоинерционного» сканера $\omega = 54$ (рисунок 2.14а) до более, чем 50 мкм при $\omega = 100$ (рисунок 2.14б). На рисунке

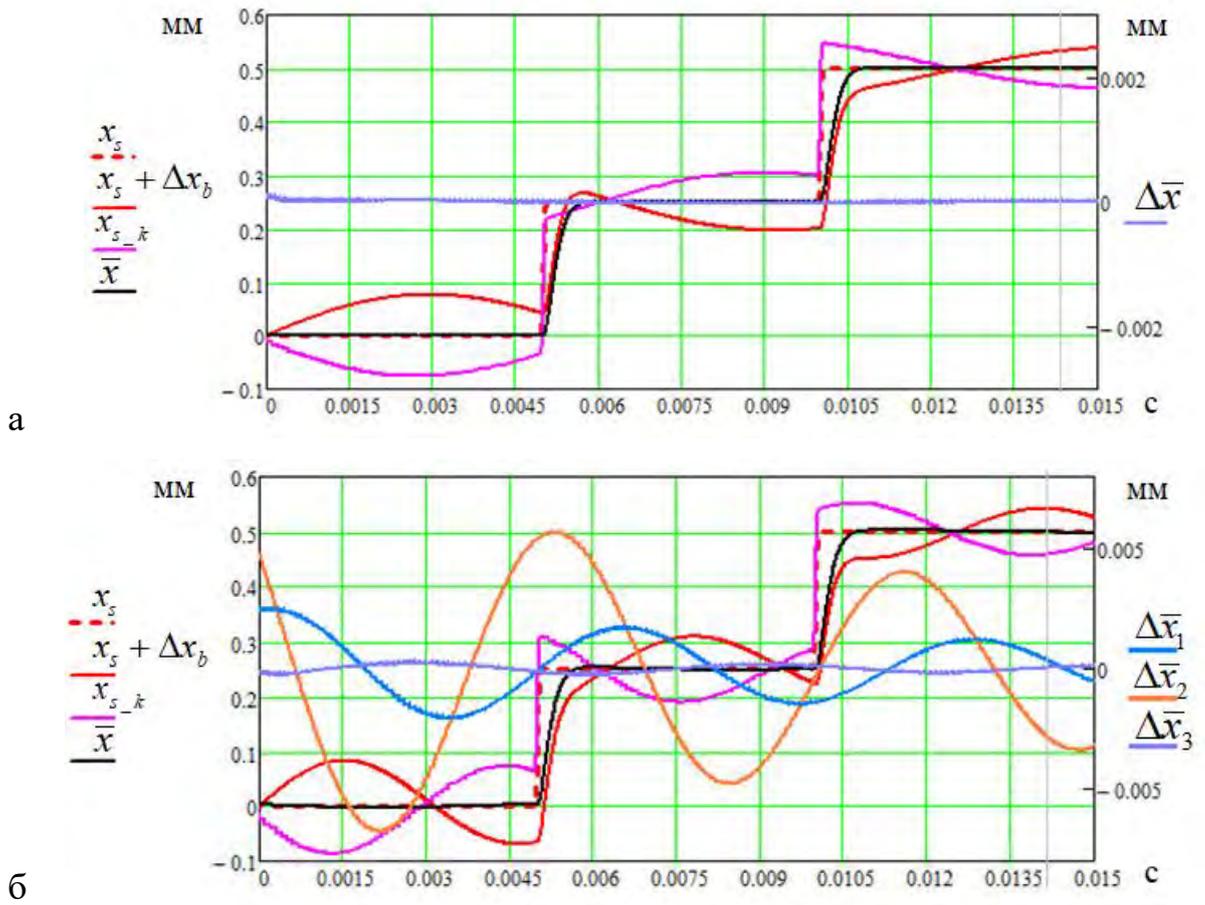
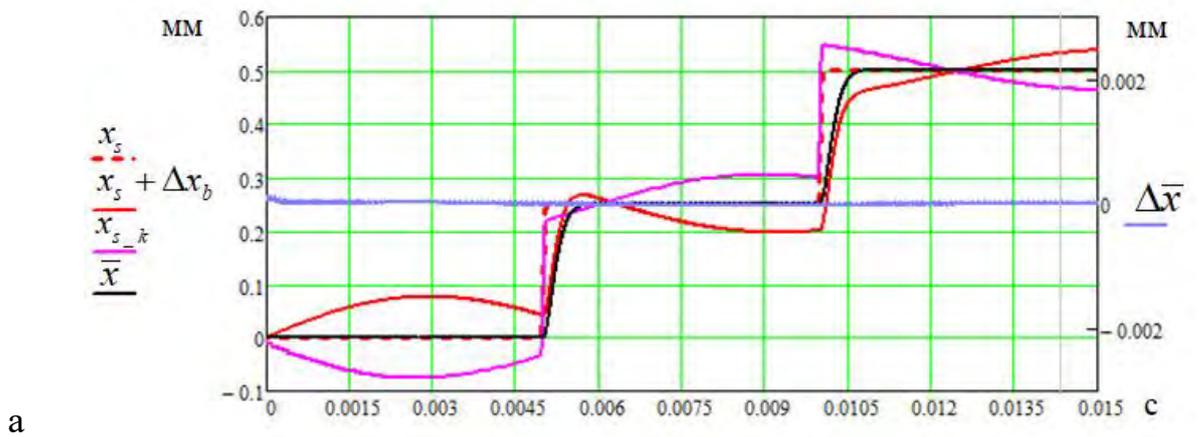
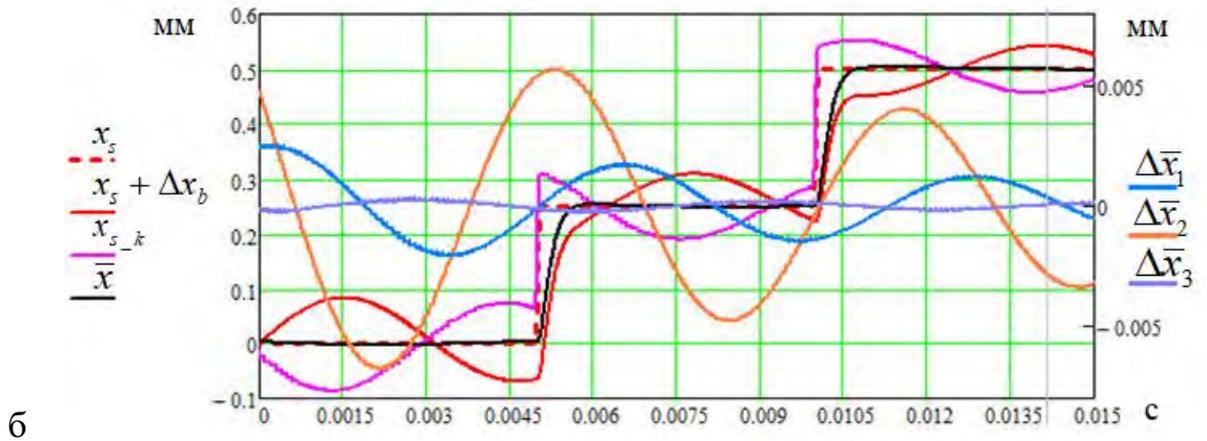


Рисунок 2.15 приведены результаты моделирования ошибки положения лазерного пучка при тех же параметрах системы, но с пропорциональным и дифференциальным корректирующими звеньями в качестве блока A_4 .





б

Рисунок 2.15 Ошибка позиционирования лазерного пучка при использовании пропорционального и дифференциального корректирующих звеньев в качестве блока A_4 : (а) $\omega = 54$, $k_p = 0,99$, $k_d = 31,5$; (б) $\omega = 100$, $k_p = 1$ и $k_d = 30,0$ для

$\Delta \bar{x}_1$, $k_p = 0,96$ и $k_d = 30$ для $\Delta \bar{x}_2$, $k_p = 0,96$, и $k_d = 31,5$ для $\Delta \bar{x}_3$

Можно видеть, что в результате введения дифференциального звена ошибка снизилась как минимум на порядок и при правильно подобранных коэффициентах (в случае для $\Delta \bar{x}_3$) пропорционального k_p и дифференциального звена k_d может быть менее 1 мкм.

Экспериментальная проверка выполнялась с использованием устройства для лазерной микроперфорации на основе CO_2 лазера мощностью 50 Вт. Общий размер обрабатываемой поверхности 300×200 мм, размер поля обработки сканирующего модуля 10×10 мм² (угол отклонения зеркал дефлекторов $\pm 5^\circ$), размер лазерного пятна в фокальной плоскости объектива 53 мкм. Схема устройства показана на рисунке Рисунок 2.16.

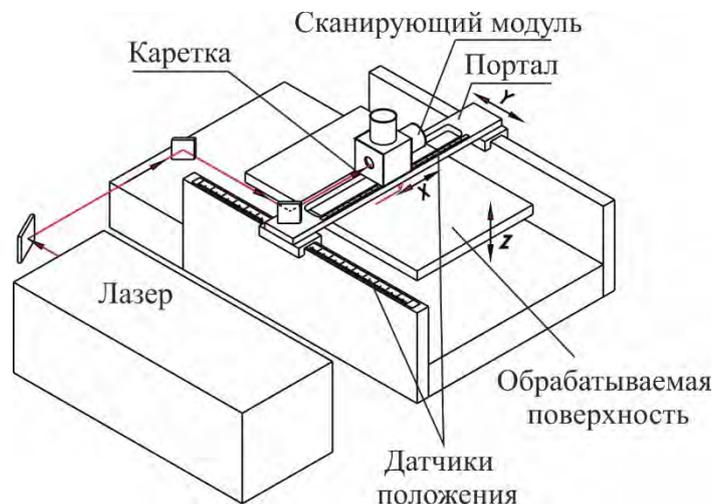


Рисунок 2.16 Схема устройства микроперфорации

Сканирующий модуль перемещается по координате x при помощи каретки, установленной на подвижном портале, который в свою очередь обеспечивает перемещение по координате y . Положение сканирующего модуля относительно обрабатываемой поверхности контролируется с помощью датчиков перемещения. Электромеханические приводы «высокоинерционного» сканера устройства выполнены на основе шаговых двигателей (ШД) с ременной передачей и относительно грубым (140 мкм) шагом перемещения. Процесс установления в заданную позицию узлов с ШД определяется электромеханическими характеристиками двигателя и эквивалентным моментом инерции нагрузки при максимальной ошибке, лежащей внутри полного шага. Характер колебаний, возникающих при позиционировании электромеханических приводов «высокоинерционного» сканера соответствует значениям, ранее использованным при моделировании ($\omega = 100$ для координаты x и $\omega = 54$ для y).

На рисунке 2.17 показан участок микроперфорации с шагом между отверстиями 250 мкм по вертикали и горизонтали, выполненной на бумажном листе с использованием вышеописанной лазерной системы. Для получения максимально однородных по форме элементов перфорации поле обработки сканирующего модуля было ограничено размером $3,5 \times 3,5$ мм².

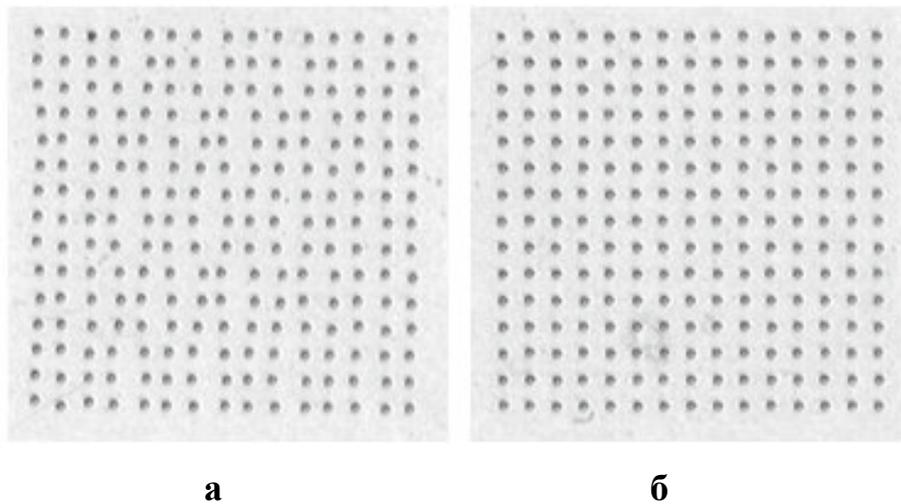


Рисунок 2.17 Микроперфорация бумажных листов, шаг между отверстиями 250 мкм, диаметр отверстий ~ 80 мкм: (а) без коррекции, (б) с коррекцией

На рисунке 2.17а показан результат перфорации без применения коррекции динамических искажений. Как показали измерения, в случае начала записи непосредственно после окончания перемещения сканирующего модуля погрешность позиционирования отверстий достигает в некоторых местах 250 мкм. При введении задержки на время успокоения электромеханических приводов «высокоинерционного» сканера (для данной системы ~ 250 мс), общее время микроперфорации полного формата составило ~37 минут, из которых, суммарное время всех задержек для «высокоинерционного» сканера – 20 минут, время его перемещений – 6 минут, чистое время обработки – 11 минут. На рисунке 2.17б – тот же изображение участок задания на обработку, полученный без введения задержки стабилизации «высокоинерционного» сканера и с применением блока коррекции, содержащего пропорциональное и дифференциальное звенья. Фактическое отклонение положения отверстий составило не более 10 мкм (измерения выполнялись при помощи микроскопа с цифровым измерением перемещения, цена деления – 1 мкм). Таким образом применение предложенного алгоритма компенсации динамических ошибок позиционирования электромеханических приводов «высокоинерционного» сканера позволило повысить производительность системы в 2 раза.

2.3 Выводы по второй главе.

1. Предложенный робастный метод калибровки позволяет использовать для записи калибровочных объектов материалы с «неидеальной» поверхностью, содержащей случайные дефекты в виде микроцарапин.

2. Метод поиска узлов сетки на основе двухступенчатой процедуры с использованием на втором этапе алгоритма кросс-корреляции фрагментов карты объекта с шаблоном, учитывающим ширину линий сетки и угол их пересечения в узле, позволяет определить координату узла с ошибкой примерно равной минимальной паспортной ошибке используемых дефлекторов.

3. Применение итерационной коррекции управляющих воздействий гальванометрического сканирующего модуля методом кусочно-планарной

интерполяции по таблице, найденной при его калибровке, обеспечивает позиционирование лазерного пучка с относительной погрешностью до $\delta \sim 10^{-5}$.

4. Применение в комплементарных системах позиционирования алгоритма динамической компенсации отклонений лазерного пучка от заданной траектории по сигналам от датчиков положения электромеханических приводов и данным калибровки «низкоинерционного» сканера, позволяет оптимизировать время обработки без потери точности.

5. Использование рассмотренной модели гальванометрического дефлектора с драйвером для определения коэффициентов корректирующего блока позволяет ускорить настройку устройства микрообработки с комплементарной системой позиционирования и избежать проведения большого числа физических экспериментов и измерений.

Глава 3 Разработка комплекса программно-аппаратных средств управления системами лазерной микрообработки с комплементарной структурой

В данной главе представлена обобщенная структура построения программно-аппаратных средств управления комплементарными системами лазерной микрообработки, ориентированных на применение во встроенных решениях. Предложен вариант разделения функций управления между вычислительными элементами системы – ЭВМ, микроконтроллером и ПЛИС. Описан комплекс программного обеспечения для микроконтроллеров и ПЛИС, а также специализированные аппаратные средства – контроллеры, разработанные на основе предложенной структуры. Приводится сравнение созданных контроллеров с существующими аналогами.

3.1 Структура программно-аппаратных средств управления устройствами с комплементарной системой позиционирования лазерного пучка

Для реализации предложенных методов и алгоритмов в устройствах с комплементарной системой позиционирования лазерного пучка, аналогичной по составу рассмотренной в главе 1 (рисунок 1.2), предложена следующая структура программно-аппаратных средств управления (рисунок 3.1).

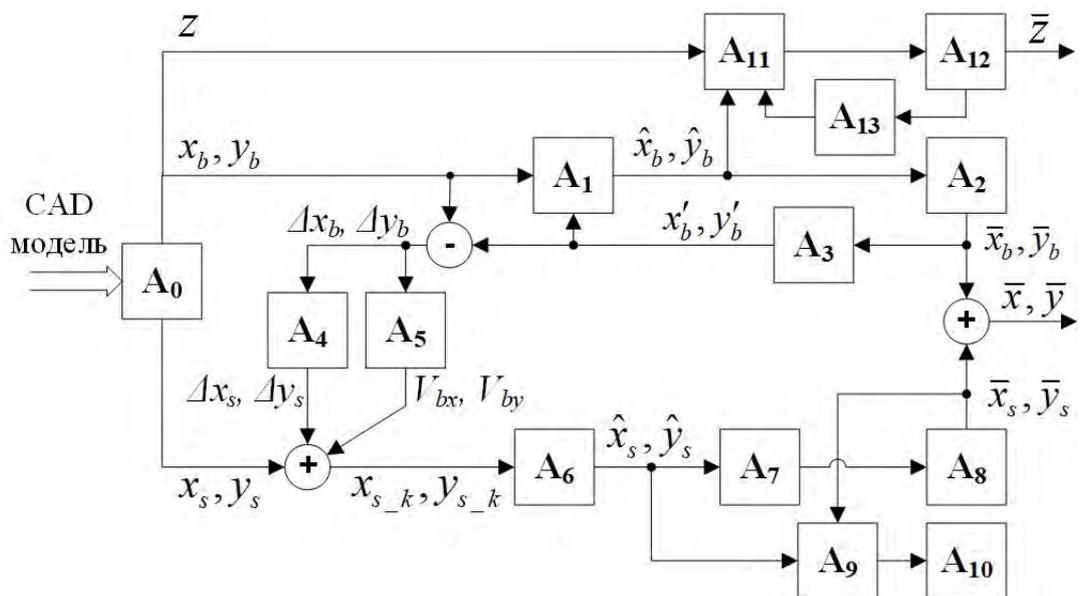


Рисунок 3.1 Структура программно-аппаратных средств управления комплементарной системой позиционирования лазерного пучка

CAD-модель задания на обработку преобразуется в модуле A_0 в цифровые команды x , y перемещения лазерного пучка по поверхности обрабатываемого изделия, и z вертикальной позиции фокусирующего механизма. Данные о горизонтальном перемещении в свою очередь разделяются на два потока: x_b , y_b (позиция «высокоинерционного» сканера) и x_s , y_s (положение лазерного пучка в координатах «низкоинерционного» сканера) такие, чтобы:

$$x = x_b + x_s, y = y_b + y_s.$$

Значения x_b , y_b , преобразованные в \hat{x}_b , \hat{y}_b с помощью модуля A_1 (либо предварительно с использованием пост-процессора) для коррекции ошибок позиционирования, используются для управления позицией двухкоординатного «высокоинерционного» сканера A_2 и определяют координаты рабочего поля «низкоинерционного» сканера A_8 относительно общего поля обработки.

Сигналы x'_b , y'_b с датчиков положения A_3 предназначены как непосредственно для управления приводами посредством обратной связи, так и для вычисления ошибки смещения «низкоинерционного» сканера относительно заданной позиции (модуль A_4):

$$\Delta x_b = x_b - x'_b, \Delta y_b = y_b - y'_b,$$

и расчета скорости перемещения двухкоординатного «высокоинерционного» сканера $V_{bx} = \frac{dx_b}{dt}$, $V_{by} = \frac{dy_b}{dt}$ (модуль A_5).

Значения x_s , y_s задают положение лазерного пучка внутри поля обработки сканирующего модуля, их преобразование выполняется в несколько этапов модулями A_6 и A_7 . На первом этапе выполняется коррекция смещения:

$$x_{s_k} = x_s + k_{bx} \times \Delta x_b + k_{vbx} \times V_{bx}, \quad (3.1)$$

$$y_{s_k} = y_s + k_{by} \times \Delta y_b + k_{vby} \times V_{by},$$

где k_{bx} , k_{by} , k_{vbx} , k_{vby} - масштабирующие коэффициенты.

Полученные в результате сложения координаты x_{s_k} , y_{s_k} пересчитываются звеном A_6 коррекции геометрических искажений, вносимых оптическими компонентами комплементарной системы. Значения \hat{x}_s , \hat{y}_s преобразуются в цифровые либо аналоговые управляющие сигналы (модуль A_7). Сканирующий

модуль A_8 , включающий в себя гальванометрические дефлекторы и их драйверы, по полученным управляющим сигналам задает положение лазерного пучка (угловое положение зеркал дефлекторов) в поле обработки.

Модуль A_9 обеспечивает синхронизацию управления лазерным источником A_{10} по данным о перемещении лазерного пучка в поле обработки сканирующего модуля \hat{x}_s, \hat{y}_s . Для поддержания постоянства экспозиции также могут быть использованы сигналы \bar{x}_s, \bar{y}_s с датчиков положения зеркал гальванометрических дефлекторов.

Перемещение привода A_{12} определяет вертикальное положение \bar{z} сканирующего модуля относительно поверхности обрабатываемого объекта. Управляется привод с помощью модуля A_{11} по командам, предварительно рассчитанным для каждой позиции двухкоординатного привода, для коррекции могут использоваться сигналы обратной связи от датчика положения A_{13} .

Управление подобной системой требует решения сложных вычислительных задач подготовки данных и одновременного управления в реальном времени несколькими исполнительными устройствами, которые к тому же должны быть синхронизованы между собой. В работе [127] утверждается, что для решения задач управления в реальном времени с многими конкурирующими процессами встроенные системы гораздо проще в проектировании как аппаратной части, так и программного обеспечения по сравнению с внешними ЭВМ. Использование упрощенных операционных систем (ОС) или непосредственная реализация приложения без какой-либо формальной ОС позволяет хорошо прогнозировать работу в реальном времени. В то же время наличие большого количества программных библиотек для создания графического интерфейса пользователя и работы со стандартными CAD-моделями, созданных для исполнения в ОС Windows или Linux, требует использования внешней ЭВМ. Исходя из вышеизложенных соображений функции управления устройством с комплементарной системой позиционирования разделены между внешней ЭВМ и

встроенным контроллером системы, содержащим процессор и ПЛИС следующим образом (рисунок 3.2).

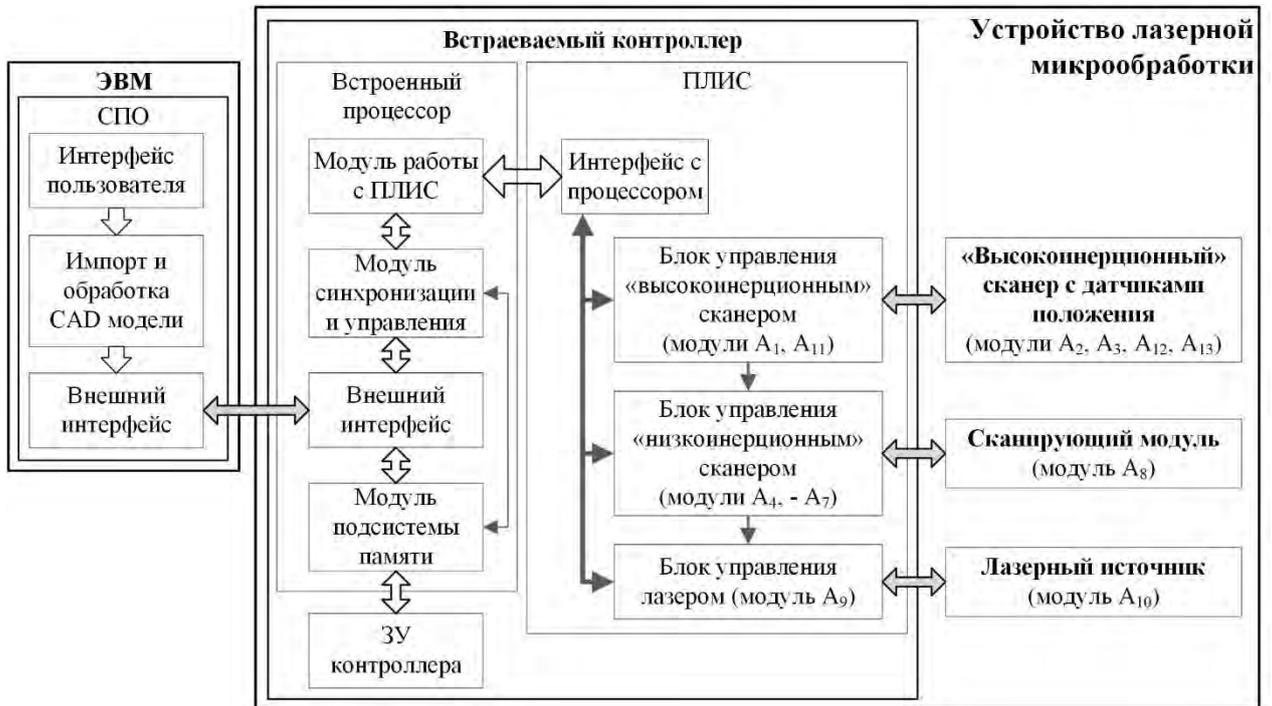


Рисунок 3.2 Функциональная схема управления комплементарной системой позиционирования лазерного пучка

Специальное программное обеспечение (СПО) верхнего уровня, исполняемое на ЭВМ, предназначено для решения задач, требующих большого объема вычислительной мощности и оперативной памяти и некритичных ко времени исполнения: импорта трехмерных САD-моделей, разбиения их по слоям, преобразования в набор команд перемещения и обработки. Также на СПО возлагаются задачи организации графического интерфейса пользователя и канала обмена данными с контроллером системы.

За обмен данными с ЭВМ, буферизацию данных на обработку, передачу команд и обработку сообщений от исполнительных устройств отвечает СПО встраиваемого процессора контроллера, требования к производительности которого могут быть значительно ниже. Основные функции управления исполнительными устройствами комплементарной системы позиционирования и их синхронизации, сбор данных от датчиков системы выполняется с помощью ПО,

реализованного на ПЛИС. Использование ПЛИС в системе управления позволяет обеспечить [128, 129]:

- синхронизацию в реальном времени всех исполнительных устройств системы с гарантированными задержками;
- гибкость и масштабируемость ПО в зависимости от решаемой задачи.

3.2 Программные средства для встраиваемого процессора

UML-диаграмма [130] классов СПО встраиваемого процессора представлена на рисунке 3.3. Прямоугольниками обозначены классы, внутри перечислены их основные поля и методы, сплошные линии с ромбом на конце – агрегацию, с пустым треугольником – наследование.

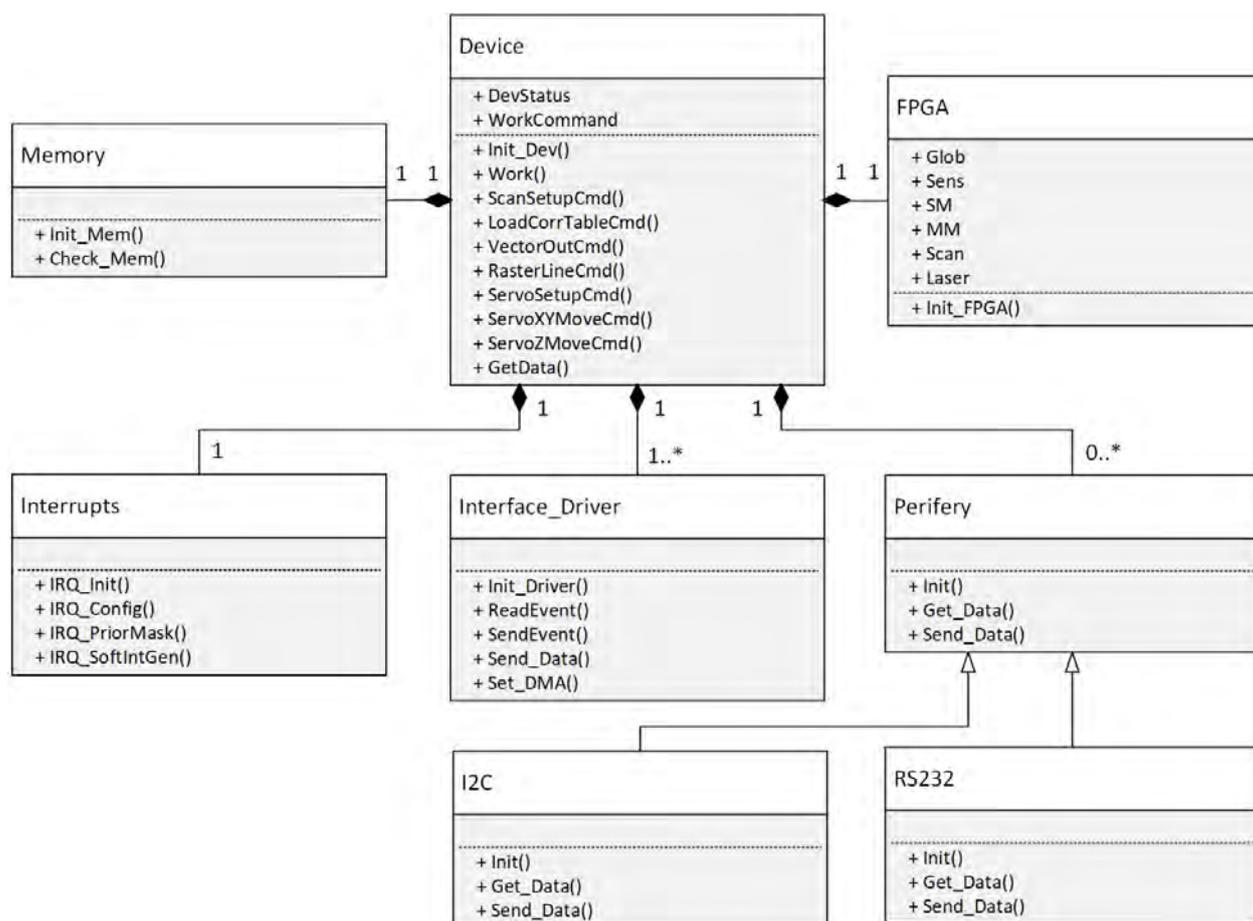


Рисунок 3.3 Диаграмма классов ПО встроенного процессора.

СПО содержит следующие основные программные компоненты.

- Основной модуль (Device) включает в себя объекты других классов, содержит поля статуса системы и методы выполнения поступающих от ЭВМ команд

инициализации, установки параметров, перемещения многокоординатных приводов, управления сканирующим модулем, опроса датчиков.

- Модуль работы с ПЛИС (FPGA) содержит описание структур управления исполнительными устройствами системы микрообработки, находящихся в ПЛИС, а также метод их начальной инициализации.
- Модуль подсистемы памяти (Memory).
- Модуль подсистемы прерываний (Interrupts).
- Модуль драйвера внешнего интерфейса приема-передачи данных от ЭВМ (Interface_Driver) содержит методы обмена данными, приема команд и отправки уведомительных сообщений.
- Модуль периферийного устройства (Periphery). В зависимости используемого процессора и требований к его внешним связям может быть производным классом для подклассов необходимых интерфейсов.

Язык реализации программного обеспечения встроенного процессора C++, основные его классы выполнены платформенно-независимыми, что обеспечивает легкость его переноса на различные аппаратные платформы.

3.3 Программные средства для ПЛИС

При разработке программных средств для ПЛИС выбран модульный подход, при котором для управления отдельным исполнительными устройствами комплементарной системы микрообработки создаются независимые функциональные блоки. Для разработки данных программных средств использован язык SystemVerilog [131], хорошо приспособленный для создания сложных систем [132] и поддерживаемый в программных продуктах проектирования большинством производителей ПЛИС. Для ПЛИС были разработаны следующие блоки управления, реализующие рассмотренные ранее алгоритмы:

- блок гальванометрическим сканирующим модулем;
- блок управления лазерным источником.

3.3.1 Блок управления «низкоинерционным» сканером

Структурная схема блока управления «низкоинерционным» сканером показана на рисунке 3.4.

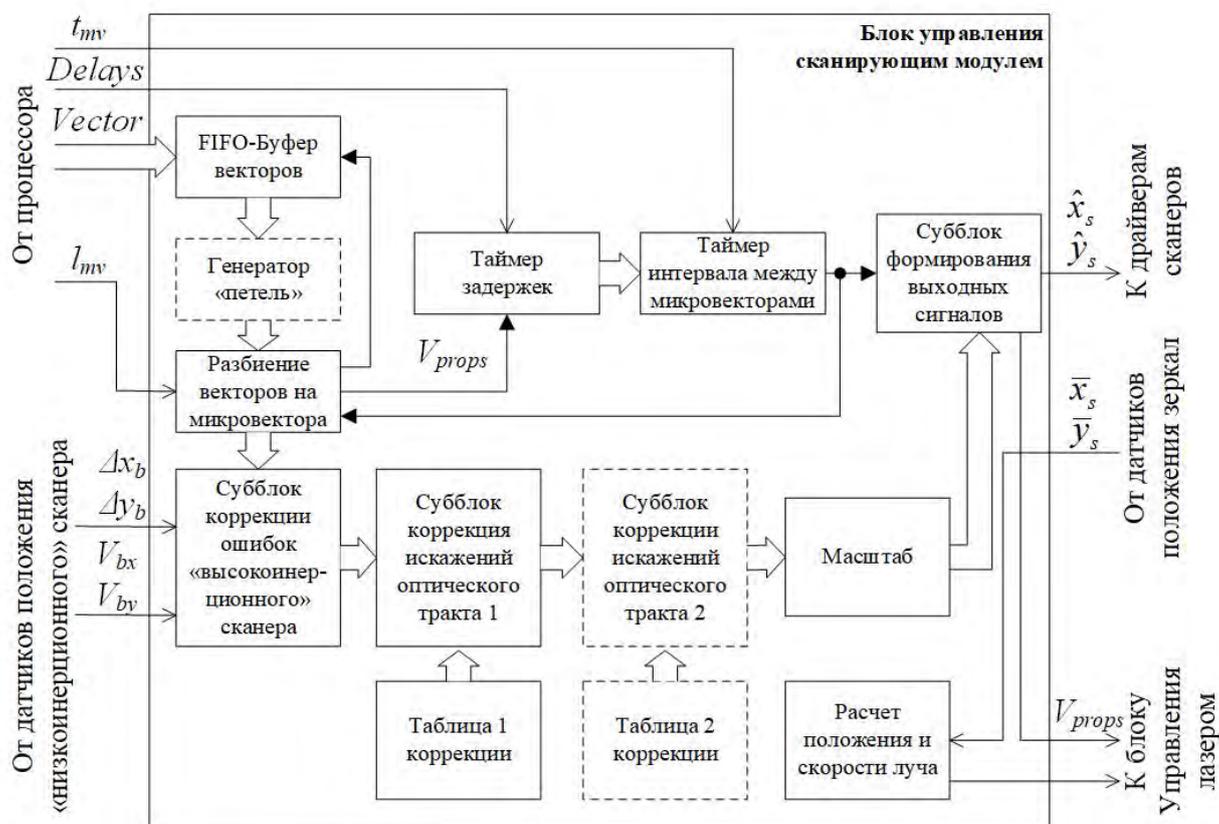


Рисунок 3.4 Структурная схема блока управления сканирующим модулем

Набор предварительно подготовленных данных поступает от процессора и буферизуется во внутреннем FIFO модуля для обеспечения непрерывности процесса обработки. Любая CAD-модель для микрообработки в поле сканирующего модуля преобразуется в совокупность структур типа VECTOR (называемых далее в тексте вектор), содержащих информацию о координатах конечной точки перемещения лазерного пучка, мощности лазерного излучения (Pwr), признак DRAW – перемещение осуществляется с включенным (Mark) или выключенным (Jump) лазерным источником, а также другие служебные данные. Применение 32-х разрядных значений координат позволяет обеспечить поддержку всех существующих и перспективных интерфейсов управления гальванометрическими дефлекторами. В случае использования метода компенсации инерционности дефлекторов «SkyWriting», выполняется анализ поступивших данных и дополнение их векторами «петель» перехода. Также при

инициализации блока от процессора поступают данные о значении задержек между векторами, длине микровекторов обработки l_{mv_m} , перехода l_{mv_j} и периоде следования микровекторов t_{mv} , которые используются для обеспечения постоянства скорости перемещения лазерного пучка.

По сигналу интервального таймера каждый из полученных векторов разбивается на микровектора, координаты которых корректируются с использованием значений позиции и скорости перемещения приводов «высокоинерционного» сканера. На следующей стадии происходит коррекция оптических искажений сканирующей системы (при необходимости в несколько итераций). По следующему сигналу интервального таймера происходит передача сформированных управляющих значений \hat{x}_s , \hat{y}_s на вход драйвера сканеров, а структуры типа *V_Props* на вход блока управления лазерным источником. По окончании обработки текущего вектора происходит считывание из буфера FIFO следующего вектора и, в зависимости от признаков текущего и следующего вектора, к значению установленного периода интервального таймера добавляется соответствующее время задержки: *Jump_Delay*, *Mark_Delay* и *Stroke_Delay* [76].

Как уже было сказано ранее – одно из основных преимуществ реализации управления на ПЛИС – это детерминированность времени выполнения. Так для блока управления сканирующим модулем суммарное время прохождения всех стадий обработки и коррекции микровектора составляет 86 тактов синхронизирующей частоты (при использовании встроенных одноктактовых умножителей и оперативной памяти ПЛИС). Из этих 86 тактов коррекция ошибок положения приводов «низкоинерционного» сканера занимает 70 тактов, а одностадийная коррекция оптических искажений 16 тактов. При частоте синхронизации 100 МГц скорость обработки составит до 10^6 микровекторов в секунду, что значительно удовлетворяет требованиям существующих на данный момент интерфейсов средств управления гальванометрическими дефлекторами.

Рассмотрим особенности реализации субблоков, реализующих предложенные алгоритмы и имеющих наиболее важное значение для достижения необходимых точностных характеристик комплементарной лазерной системы.

3.3.1.1 Субблок компенсации динамических ошибок позиционирования «высокоинерционного» сканера

Расчет скорректированных значений x_{s_k} , y_{s_k} в субблоке выполняется по выражениям (3.1). Поскольку коэффициенты k_{bx} , k_{by} , k_{vbx} , k_{vby} являются числами с плавающей запятой одинарной точности (float), а входные и выходные данные – целыми числами, то для выполнения вычислений требуется выполнить привести входные данные к плавающему типу, выполнить умножение чисел с плавающей запятой и привести результат обратно к целому типу. Каждое такое преобразование типа данных требует порядка 5-6 тактов, умножение двух плавающих чисел 8 тактов, что позволяет получать искомые значения на выходе за 65-70 тактов в зависимости от применяемой ПЛИС.

3.3.1.2 Субблок коррекции статических искажений оптического тракта

Входными данными субблока являются значения x_{s_k} , y_{s_k} , поступающие с предыдущего субблока, и таблица коррекции, передаваемая процессором при инициализации. При разработке блока принято, что калибровочная сетка квадратная, то есть $N_x = N_y$, и N имеет значение $2^k + 1$. Для хранения таблицы коррекции используются два модуля памяти с 64-х разрядной шиной данных размером N^2 , в одном из которых содержатся предварительно рассчитанные для всех узлов калибровочной сетки $a(i, j)$ значения $\Delta x_{s_c}^{ij}$, $\Delta y_{s_c}^{ij}$, в другом $\Delta x_{s_{mid}}^{ij}$, $\Delta y_{s_{mid}}^{ij}$ (см. 2.1.3).

Вычислительная часть субблока реализует предложенный алгоритм кусочно-планарной интерполяции и выполнен как конечный автомат (state machine).

Расчет значений \hat{x}_s , \hat{y}_s выполняются за 9 этапов, этапы 1 и 9 выполняются за 1 такт, остальные за 2 такта. Для выполнения умножений на всех этапах используется один и тот же аппаратный множитель, что позволяет экономить ресурсы ПЛИС, однако увеличивает длительность вычислений. В случае

применения индивидуальных множителей для каждого длительность вычислений уменьшилась бы в 1,5 раза. Вычисления выполняются в следующем порядке.

1. Вновь поступившие координаты микровекторов x_s , y_s буферизуются во избежание изменений в процессе работы автомата.
2. Для текущих координат вычисляется начальные адреса $TabAddr1$ и $TabAddr2$ корректирующих значений $\Delta x_{s_c}^{ij}, \Delta y_{s_c}^{ij}$ и $\Delta x_{s_{mid}}^{ij}, \Delta y_{s_{mid}}^{ij}$ в соответствующих модулях памяти:

$$TabAddr1 = TabAddr2 = \frac{y_s}{2^{N-1-\sqrt{(N-1)}}} \times (N-1) + \frac{x_s}{2^{N-1-\sqrt{(N-1)}}}.$$

Поскольку число $N-1$ является степенью числа 2, то деление сводится к сдвигу вправо на $(N-1-\sqrt{(N-1)})$.

Выполняется расчет значений x_s^q и y_s^q : $x_s^q = \frac{x_s}{N-1}$, $y_s^q = \frac{y_s}{N-1}$. Деление также сводится к сдвигу вправо на $\sqrt{N-1}$.

3. Происходит чтение корректирующих значений $\Delta x_{s_{mid}}^{ij}, \Delta y_{s_{mid}}^{ij}$, расположенных по адресу $TabAddr1$. Вычисляются промежуточные значения выражений $A = (D - x_s^q + y_s^q)$ и $B = (x_s^q - y_s^q)$.

4. Определяется принадлежность координат к определенному сектору области (рисунок 2.7).

– Если $B > 0$, то адрес $TabAddr1$ увеличивается на 1, а если при этом $A < 0$, то A инвертируется ($A = -A$) и пересчитывается $TabAddr2 = TabAddr2 + (N-1) + 2$.

– Если $B < 0$, то $TabAddr1 = TabAddr1 + (N-1) + 1$ и инвертируется B , а если при этом $A < 0$, то A инвертируется и $TabAddr2 = TabAddr2 + (N-1) + 2$.

5. Выполняется умножение $\Delta x_{s_{mid}}^{ij}, \Delta y_{s_{mid}}^{ij}$ и считывание значений $\Delta x_{s_c}^{ij}, \Delta y_{s_c}^{ij}$ из области памяти с адресом $TabAddr1$.

6. Выполняется умножение $B \times \Delta x_{s_c}^{ij}, B \times \Delta y_{s_c}^{ij}$ и считывание значений $\Delta x_{s_c}^{ij}, \Delta y_{s_c}^{ij}$ из области памяти с адресом $TabAddr2$.

7. Выполняется сложение предварительно найденных значений.
8. Выполняется сложение входных координат микровектора и найденных для них значений коррекции.
9. Происходит проверка результирующих значений \hat{x}_s , \hat{y}_s на превышение максимальных значений.

3.3.1.3 Субблок формирования выходных значений

Субблок предназначен для преобразования числовых значений \hat{x}_s , \hat{y}_s в формат интерфейса используемого сканирующего модуля. Реализованы последовательные интерфейсные протоколы 24 бит GSBUS (Cambridge Technology Inc.), 20 бит SL2-100 (ScanLab), 16 бит XY2-100, а также доработанный SPI для подачи сигналов на ЦАП аналогового выхода.

3.3.2 Блок управления лазерным источником

Основными требованиями при разработке блока стали: возможность управления различными типами лазерных источников, реализация динамического регулирования выходной мощности, а также синхронизация импульсов излучения с позицией лазерного пучка в поле записи сканирующего модуля. Структура блока представлена на рисунке 3.5.

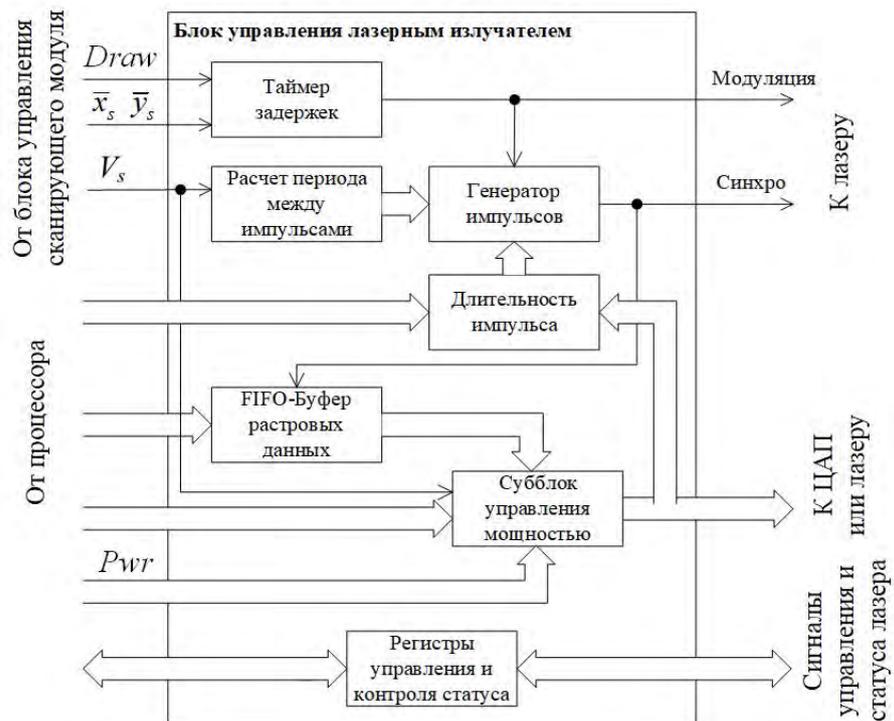


Рисунок 3.5 Структурная схема блока управления лазерным источником

Синхронизация лазерного излучателя осуществляется по сигналам интервального таймера. Период следования импульсов может быть задан фиксированным, либо изменяться в зависимости от скорости перемещения пучка в поле обработки сканирующего модуля V_s . Длительность импульса может быть также может изменяться как при инициализации блока, так и в зависимости от заданной мощности, например, для управления мощностью CO_2 .

Сигнал модуляции излучения формируется по входному значению признака DRAW структуры вектор, поступающей от блока управления сканирующим модулем, либо по достижении зеркалами сканеров заданного положения. Таймер задержек позволяет реализовать классическую схему управления сигналом модуляции путем добавления временных интервалов включения и выключения: LaserOn_Delay и LaserOff_Delay [76]. В зависимости от используемого в системе лазера сигнал модуляции может использоваться как для управления соответствующим цифровым входом, так и для включения/выключения генератора импульсов.

Для реализации растрового режима обработки в структуре блока предусмотрена буферизация данных растровой строки. Чтение растровых данных происходит по сигналу частоты синхронизации лазера. Значения яркости текущего элемента растровой строки могут быть использованы для управления сигналом модуляции либо непосредственно передаваться в модуль управления мощностью лазерного источника.

Управление мощностью излучения может также выполняться по значению мощности для текущего вектора, либо в зависимости от скорости перемещения лазерного пучка. В зависимости от используемого в системе лазера, установленное значение мощности преобразуется в скважность импульсов либо цифровой сигнал управления ЦАП или подается непосредственно на вход лазера.

Также блок содержит набор регистров и конфигурируемых цифровых входов/выходов для реализации особенностей управления используемого лазера, фиксации его состояния и сообщений об аварийных ситуациях.

3.4 Аппаратные средства управления комплементарной системой позиционирования

Для использования рассмотренных выше алгоритмов и программных модулей при управлении устройствами микрообработки с комплементарной системой позиционирования разработана серия специализированных аппаратных средств – встраиваемых контроллеров.

Основой наиболее современного контроллера ScanControl v5e является SoC (система на кристалле) 5CSXC5 компании Intel (ранее Altera), совмещающая в себе 2-х ядерный 32-х разрядный процессор с архитектурой ARM A9 и ПЛИС [133]. Для буферизации данных доступно до 512 МБ оперативной памяти типа DDR3, для хранения программного кода – 128 МБ ПЗУ типа FLASH. Физический интерфейс связи с ЭВМ может быть организован по каналам Ethernet стандарта IEEE 802.3ab (пропускная способность до 1000 Мбит/с) либо USB 2.0 (до 480 Мбит/с).

Одно из ядер встроенного процессора SoC используется для взаимодействия с ЭВМ по протоколу Ethernet, на его основе организован программный драйвер канала и стек TCP/IP на базе его реализации с открытым кодом LwIP [134, 135]. На другом ядре реализованы интерфейсы с памятью типа DDR3 и QFLASH, интерфейс USB, функции декодирования команд и их передачи на исполнительные устройства, а также обработки сообщений и прерываний от них.

Все функции по управлению исполнительными устройствами и опросу датчиков лазерного устройства с комплементарной системой позиционирования реализованы в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), которая содержит: 32075 логических модуля (ALM); 3970 Кб статической памяти; 174 умножителя 18х18; 6 блоков фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ); 288 конфигурируемых входов-выходов различных форматов (LVTTTL, LVCMOS, LVDS и т.п.). На основе имеющихся ресурсов ПЛИС могут быть одновременно реализованы:

- до 3 каналов управления «низкоинерционными» сканерами с цифровыми интерфейсами GSBUS, SL2-100, XY2-100, или аналоговым входом;

- до 3 каналов приводов «высокоинерционного» сканера с BLDC двигателем с коррекцией положения по калибровочной таблице;
- до 6 каналов приводов с шаговым двигателем;
- с аналоговые и цифровые каналы управления лазерами различного типа;
- конфигурируемые цифровые каналы взаимодействия с датчиками;
- модули управления дополнительным оборудованием.

Внешний вид контроллера показан на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 Внешний вид контроллера ScanControl v5e

По своим техническим характеристикам разработанные контроллеры не уступают серийной продукции ведущих мировых производителей (ScanLab [49], Cambridge Technology Inc. [136]) аналогичного назначения, а по набору интерфейсов и гибкости конфигурирования превосходят их (таблица 3.1).

Таблица 3.1

	RTC 6, ScanLab (Германия)	EC1000, (CamTech США)	ScanControl v5e ИАиЭ СО РАН
Управление «низкоинерционным» гальванометр. сканером	Цифровое, 20 бит, SL2-100, XY2-100	Цифр. 24 бит, GSBUS 16 бит XY2-100, аналог. 16 бит	Цифр. GSBUS, SL2-100, XY2-100, аналоговое 16 бит
Многоступенчатая коррекция дисторсии	Нет	нет	да
Режим записи	Векторный, растровый	Векторный, растровый	Векторный, растровый
Динамическая коррекция положения сканирующего модуля	Да, по одной координате	Да, по одной координате	Да, по двум координатам и

			скорости перемещения
Выходы управления «высокоинерционными» приводами	Опционально ШД – 2	нет	ШД – 6 шт., BLDC – 3 шт.
Входы датчиков положения приводов «высокоинерционных» сканера	Опционально 2	Опционально 2	7
Количество конфигурируемых цифровых каналов			Все цифровые каналы
Конфигурирование внутренней структуры	Управление цифровыми и аналоговыми входами/ выходами	Управление цифровыми и аналоговыми входами/ выходами	Создание сложных блоков формирования требуемой временной диаграммы

Известные на данный момент контроллеры китайского производителя SinoScan [137] и российского Атеко [138] по характеристикам значительно уступают предложенным решениям и не позволяют осуществлять полноценного управления комплементарной системой. Отдельно следует отметить уже упомянутые решения компании Aerotech [48], которые не являются интегрированными решениями, а состоят из множества модулей, соединенных через управляющий компьютер посредством интерфейса FireWire. что увеличивает сложность и стоимость системы управления, а также уменьшает детерминированность задержек.

3.5 Выводы по третьей главе.

1. На основе предложенных алгоритмов разработаны и созданы программно-аппаратные средства управления комплементарными сканирующими системами, позволяющие в режиме реального времени выполнять:

- динамическую коррекцию положения лазерного пучка с помощью гальванометрических сканеров в зависимости от ошибки положения и скорости перемещения многокоординатных приводов;
- коррекцию оптических искажений (с возможностью изменения количества корректирующих ступеней для повышения точности);

– динамическое управление мощностью лазерного излучателя в зависимости от скорости перемещения пучка по поверхности обрабатываемого изделия.

2. Реализация ПО ПЛИС в виде отдельных функциональных блоков для каждого из видов исполнительных устройств системы дает возможность осуществлять выбор аппаратных средств требуемой производительности, а также гибко изменять функциональные возможности устройства микрообработки (добавлять дополнительные исполнительные устройства, менять их конфигурацию) в зависимости от решаемой задачи.

3. По своим техническим характеристикам разработанный программно-аппаратный комплекс средств управления устройствами микрообработки с комплементарной системой позиционирования не уступает серийной продукции ведущих мировых производителей (Cambridge Technology Inc., ScanLab, Aerotech) аналогичного назначения, а по набору интерфейсов и гибкости конфигурирования превосходит их.

Глава 4 Практическое применение разработанных программно-аппаратных средств в устройствах лазерной микрообработки

В настоящей главе рассмотрены особенности реализации предложенных алгоритмов и разработанного комплекса программно-аппаратных средств составе устройств лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования исследовательского и промышленного назначения; приведены экспериментальные результаты обработки, иллюстрирующие эффективность их применения.

4.1 Лазерная система микрообработки движущихся полимерных носителей

Для защиты документов широко применяется лазерное формирование специальных признаков в виде изображений, перфорации, маркировки на поверхности. В качестве одного из таких признаков документов используется внедрение в толщу листа полимерной ленты [139] шириной несколько миллиметров и толщиной десятки микрон с лазерной перфорацией. Поскольку протяженность бумажного листа для изготовления партии документов или ценных бумаг обычно составляет тысячи метров, то и внедряемая лента должна иметь соответствующую длину. При серийном производстве защищенной полиграфической продукции необходимы сотни километров ленты с элементами перфорации, выполненными с высокой (десятки мкм) точностью и без следов обгорания или оплавления [140], которые могут препятствовать внедрению в бумагу. Проведенные ранее в ИАиЭ СО РАН исследования показали [141], что для достижения качественных характеристик обработки тонких листов диэлектрических материалов с помощью CO_2 лазера с длиной волны 10,6 мкм, необходимо обеспечить скорость перемещения лазерного пучка порядка 1 м/с и технологический режим резки, реализуемый за счет высокой плотности мощности. Требуемые скорость перемещения пучка и качество обработки могут быть достигнуты при использовании для развертки лазерного пучка гальванометрических дефлекторов и короткофокусного сканирующего объектива.

Очевидно, что перфорация длинной ленты может быть выполнена только при ее перемещении, а значит может быть применена комплементарная система позиционирования, где «высокоинерционным» сканером будет механизм перемещения ленты, а «низкоинерционным» - гальванометрический сканирующий модуль.

Типичные элементы перфорации представляют собой геометрические фигуры (круги, эллипсы, многоугольники) с линейными размерами от 0,2 до 5 мм, количество таких объектов на 1 см² ленты – от 10 до 50 шт. При средней ширине используемой ленты 1 см и элементах перфорации в виде окружностей диаметром 1 мм, равномерно размещенных на ней с плотностью 20 шт./см², суммарный пробег лазерного пучка (с учетом векторов перехода) при обработке 1 см² составит порядка 90 мм, а время его перемещения при скорости 1 м/с – 90 мс (без учета задержек дефлекторов). При таких параметрах перфорации и длине ленты 1 км только лазерная обработка займет не менее 15 минут, а при старт-стопном режиме обработки за счет задержек на время успокоения механизма перемещения ленты скорость обработки уменьшится в несколько раз. Возникает задача качественной и высокопроизводительной лазерной перфорации полимерных лент в процессе ее перемещения (перемотки).

Решение такой задачи требует применения специализированных программно-аппаратных средств для подготовки данных и управления лазерной обработкой с учетом параметров продольного движения материала и возможных смещений в поперечном направлении. Кроме того, в случае обработки движущегося материала при надрезе, сквозном резе или перфорировании в соответствии с заданным контуром, к точности контроля положения пучка на поверхности накладываются дополнительные требования. Поскольку траектория движения лазерного пучка относительно материала всегда составляет замкнутую фигуру, то вследствие перемещения материала начало и конец траектории движения лазерного пучка будут находиться в различных участках поля обработки сканирующего объектива, что может приводить к незамкнутому контуру элементов перфорации из-за статических искажений, вносимых компонентами оптической системы.

Для решения задач микрообработки движущихся материалов разработано устройство [25], схематично изображенное на рисунке 4.1.

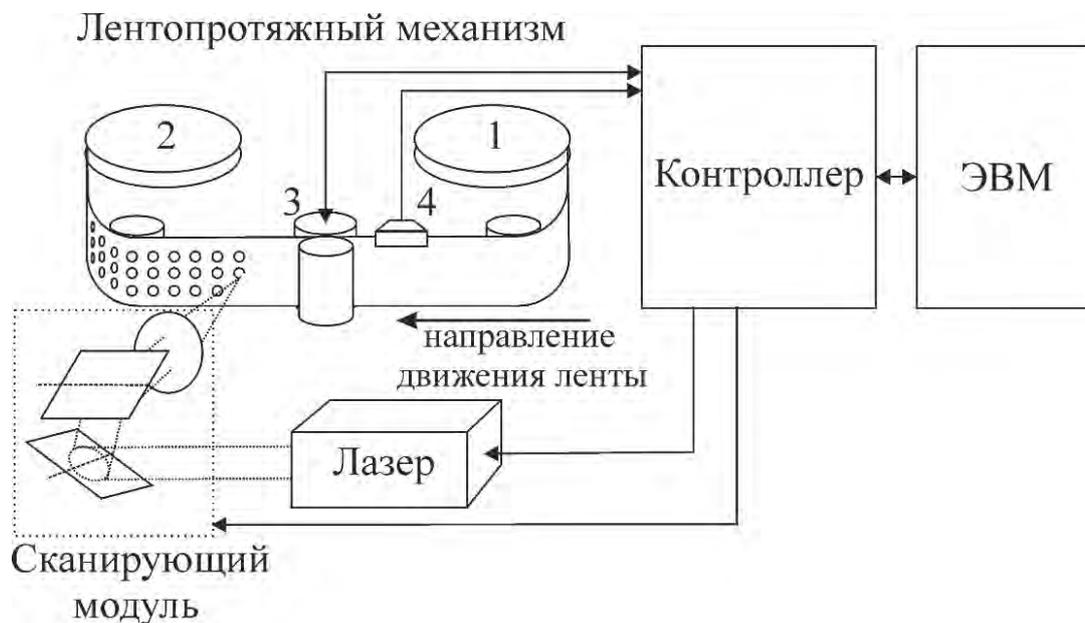


Рисунок 4.1 Схема устройства микрообработки движущихся материалов

Лентопротяжный механизм устройства выполнен по трехдвигательной схеме [142], где два электродвигателя с подающей (1) и принимающей (2) катушками на осях осуществляют натяжку ленты, а ведущий электродвигатель (3) задает направление и скорость перемещения ленты, зажатой между эластичной насадкой на его валу и резиновым прижимным роликом. На вал ведущего двигателя также установлен инкрементный датчик углового положения выполняющий роль датчика положения материала, дискретность которого составляла 23 мкм. Также лентопротяжный механизм оснащен оптическим датчиком положения края ленты (4) на основе линейной фотоматрицы с разрешением 10 мкм. Лентопротяжный механизм перемещения материала позволял получать скорость в диапазоне 0,01 – 0,5 м/с. Участок ленты перемещается в зону обработки сканирующего модуля, осуществляющего развертку лазерного пучка и состоящего из гальванометрических дефлекторов СТ 6420 (Cambridge Technology Inc.) с аналоговыми драйверами и объектива плоского поля с областью записи 20 x 20 мм и размером сфокусированного пятна 100 мкм. Геометрические искажения, вносимые компонентами оптической системы, без коррекции составляли $\approx 3\%$ (или около 600 мкм на краю поля записи объектива). В качестве источника излучения в

системе использовался CO₂ лазер ULM-50 (Universal Laser) с максимальной мощностью непрерывного излучения 50 Вт.

За управление всеми узлами устройства и их синхронизацию отвечает контроллер ScanControl, для подготовки данных и организации интерфейса оператора используется внешняя ЭВМ.

Для обеспечения непрерывной обработки ленты предложен следующий способ покадрового представления задания на обработку (рисунок Рисунок 4.2).

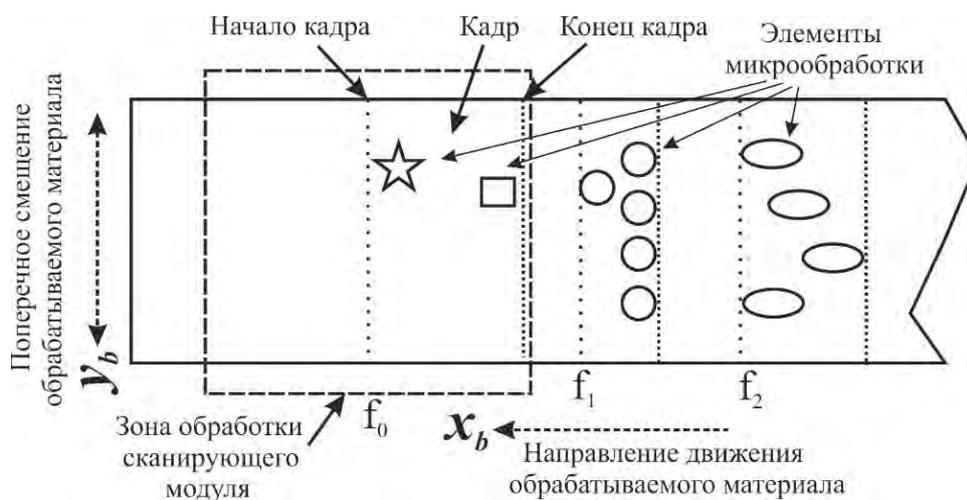


Рисунок 4.2 Покадровое представление задания для микрообработки ленточных материалов

Из общего задания для обеспечения непрерывной записи формируется последовательность кадров $f_0 \dots f_i$ (где i – порядковый номер кадра). Размер каждого кадра выбран равным $L_x/2$, где L_x – размер поля обработки сканирующего модуля в направлении движения материала. Размер кадра в поперечном направлении равен ширине ленты и должен быть меньше вертикального размера поля обработки L_y на максимальный возможный размер перемещений материала в этом направлении. Начало координат каждого кадра f_i соответствует определенной позиции x_f^i на перемещаемом материале, с которой все элементы микрообработки кадра становятся достижимы в поле записи сканирующего модуля. Положение лазерного пучка для отдельных элементов внутри кадра определяется в координатах поля обработки сканирующего модуля x_s, y_s .

Подготовка данных и формирование задания на обработку согласно предложенному способу выполняется с помощью СПО верхнего уровня, исполняемого на управляющей ЭВМ. При помощи СПО информация о форме объектов микрообработки в виде векторизованных элементов траектории движения лазерного пучка может быть импортирована из файлов данных промежуточных форматов, например, HPGL, подготовленных в любом редакторе векторной графики (CorelDraw и т.п.). Импортированные и размещенные на рабочем поле СПО в требуемом порядке объекты, разбиваются на кадры и образуют общее задание для микрообработки по всей длине ленты (рисунок 4.3).

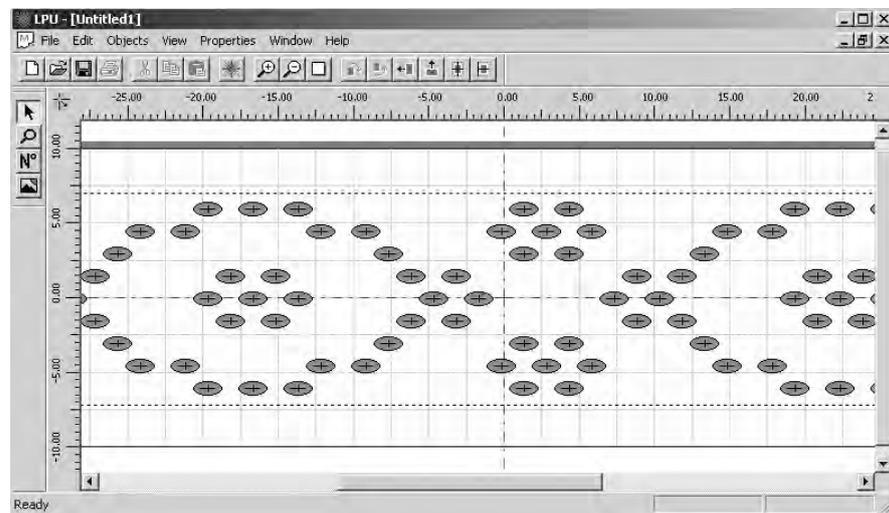


Рисунок 4.3 Задание на обработку в рабочем окне СПО

Подготовленные данные поступают в контроллер, где в блоке управления «низкоинерционным» сканером (см. главу 3, параграф 3.3.1) преобразуются следующим образом (рисунок 4.4).

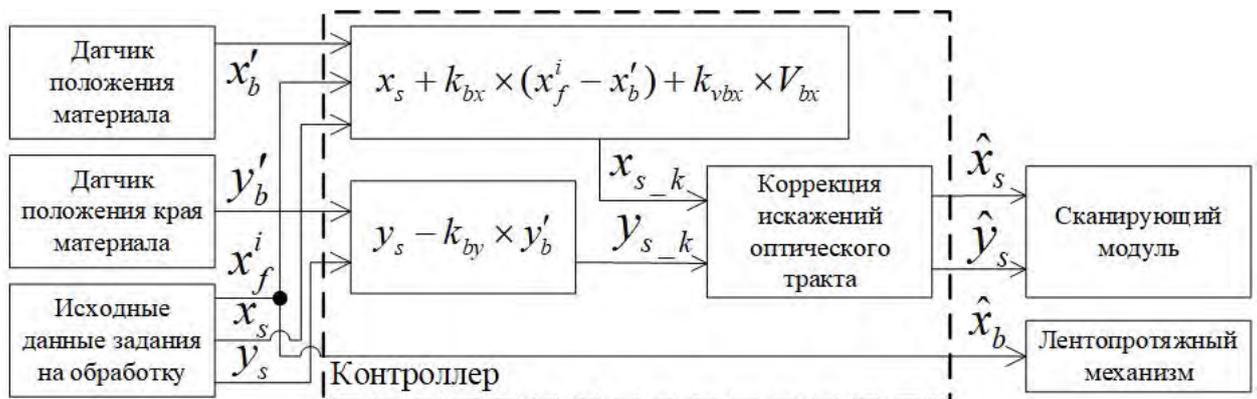


Рисунок 4.4 Последовательность преобразования данных в контроллере устройства при лазерной микрообработке движущейся ленты

На ведущий электродвигатель лентопротяжного механизма подается управляющее воздействие \hat{x}_b соответствующее координатам позиции кадра x_f^i на материале, текущее положение контролируется по датчику положения материала. При достижении лентой позиции очередного кадра начинается процесс записи элементов задания с помощью сканирующего модуля, при этом происходит коррекция заданного значения координаты x_s на величину смещения ленты Δx_b относительно начальной позиции текущего кадра x_f^i в данный момент времени с учетом скорости перемещения ленты V_{bx} . Также на величину поперечного смещения материала Δy_b корректируется текущее значение y_s . Полученные значения x_{s_k} и y_{s_k} преобразуются с помощью алгоритма коррекции геометрических искажений сканирующей системы и таблицы смещений, полученных в ходе предварительной калибровки, в управляющие воздействия дефлекторов \hat{x}_s, \hat{y}_s .

В ходе экспериментальных работ производилась обработка полимерных (полиэтиленовых и полипропиленовых) лент с толщиной от 15 до 50 мкм, как прозрачных, так и с нанесенной металлизацией либо защитными радужными голограммами. На рисунке 4.5 показаны изображения, полученные при различных параметрах настройки системы управления устройством.

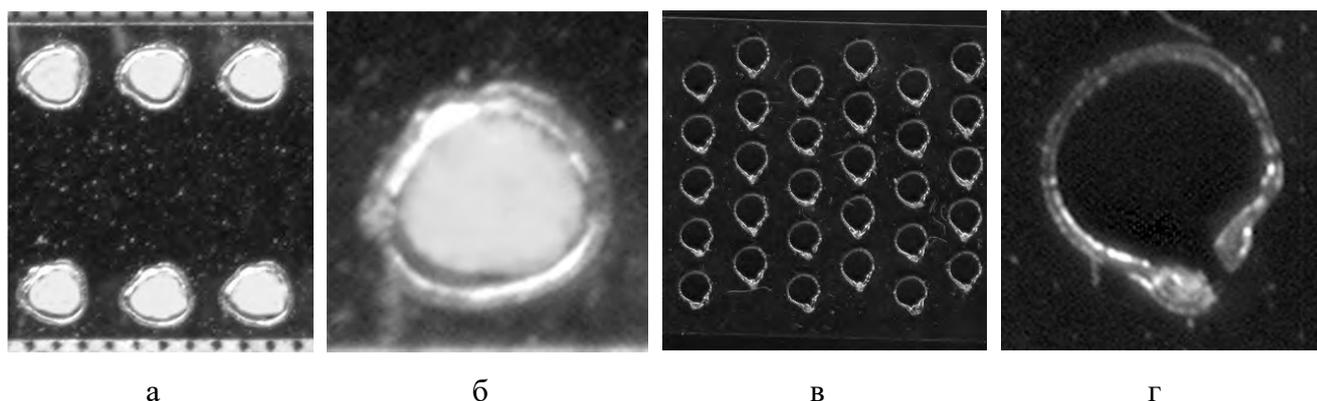


Рисунок 4.5 Иллюстрация различных искажений при микроперфорации в зависимости от параметров настройки системы управления устройством

На рисунке 4.5 (а, б) представлены изображения участка тонкой металлизированной пленки толщиной 50 мкм, двигавшейся со скоростью 5 см/с, с перфорацией в виде круглых отверстий диаметром 0,75 мм и отдельного элемента

перфорации. При скорости перемещения лазерного пучка $v = 0.2$ м/с происходит значительное оплавление края (рисунок 4.5 б), кроме того, нестационарность процесса плавления при малой скорости сильно искажает форму отверстия. На рисунках 4.5 (в, г) изображен участок пленки толщиной 25 мкм с перфорацией в виде отверстий диаметром 1 мм и отдельный элемент перфорации (скорость перемещения ленты 0,1 м/с, скорость перемещения лазерного пучка $v = 0.5$ м/с). Частичное либо полное отсутствие замыкания траектории пучка связано с тем, что обработка производилась без применения коррекции искажений оптической системы. Из рисунков видно, что обработка полимерных материалов на низких скоростях не позволяет получить качественную и точную кромку реза.

Образцы перфорированной пленки, полученные в результате микрообработки при скорости перемещения лазерного пучка ≈ 1.5 м/с, с использованием коррекции статических искажений оптической системы и динамических искажений, вызванных инерционностью гальванометрических дефлекторов, «SkyWriting» (см. главу 1, параграф 1.2.4) представлены на рисунке 4.6.

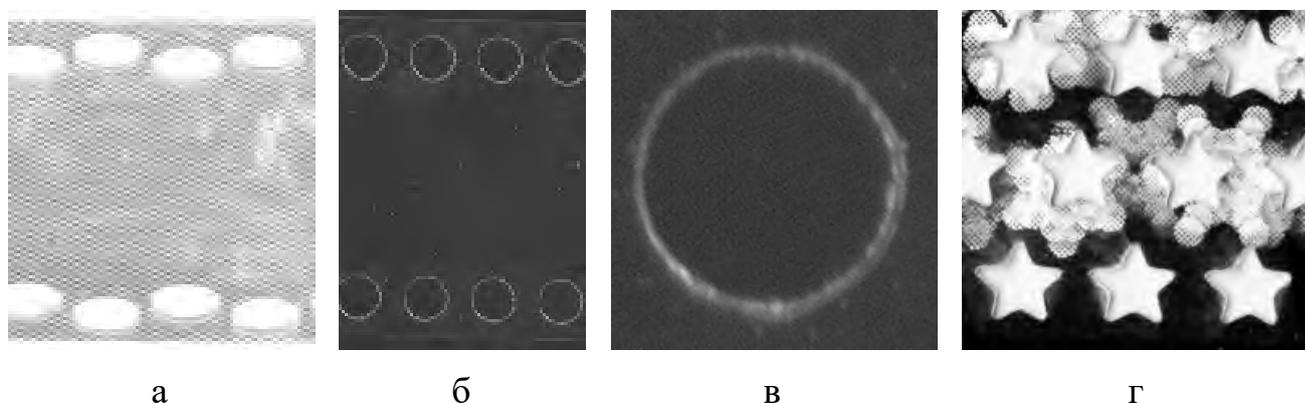


Рисунок 4.6 Образцы микроперфорации, полученные при соблюдении требуемого технологического режима

На рисунке 4.6а показан образец с эллиптической перфорацией линейными размерами 2 x 1 мм; на рисунке 4.6б – с перфорацией в виде окружностей диаметром 1 мм; а его увеличенный фрагмент на рисунке 4.6в. Технология также позволяет выполнять перфорацию объектов с контурами сложной формы, например в виде пятиконечных звезд (рисунок 4.6г). Все образцы получены при скорости перемещения материала 0,1 – 0,2 м/с.

В результате экспериментов было подтверждено, что качественная (без следов обгорания, оплавления) обработка тонких полимерных материалов возможна при скорости движения лазерного пучка порядка метра в секунду. Реализация в контроллере устройства алгоритмов коррекции статических искажений, вносимых компонентами оптической системы, и динамических ошибок позиционирования электромеханических приводов позволила обеспечить требуемые режим, скорость и качество обработки непрерывно движущейся ленты. В ходе работы были найдены оптимальные параметры обработки для пленок с различным составом, толщиной и покрытиями. С помощью созданного устройства микроперфорации для НИИ Гознака было изготовлено несколько опытных партий ленты общей длиной более 100 км, использованной впоследствии при изготовлении экспериментальной полиграфической продукции.

4.2 Устройство промышленной маркировки средств взрывания

Для обеспечения контроля за оборотом и применением взрывчатых веществ (ВВ) важную роль играет маркировка средств взрывания [143-145]. Такая маркировка обычно представляет собой комбинацию букв и цифр, а также штрих-код, характеризующие предприятие-изготовитель, дату и время изготовления, а также индивидуальный номер взрывника, осуществляющего взрывание. Возможными способами выполнения маркировки на внешней поверхности гильзы детонатора являются химическое травление, механическая штамповка или каплеструйное нанесение краски. Однако механический и химический способы маркировки приводят к увеличению числа отказов срабатывания, при взрывании в агрессивных и обводненных средах, что связано с разупрочнением оболочки из-за низкой коррозионной стойкости материала гильз детонаторов, а также появлением микротрещин при механической деформации напряженного материала. Маркировка, выполненная краской, недостаточно устойчива к механическим воздействиям.

В последнее время для маркировки средств взрывания стали использоваться щадящие лазерные методы [146], которые обеспечивают устойчивость нанесенной

информации к механическим повреждениям и воздействию окружающей среды. Основным требованием для серийного применения такого метода маркировки является производительность не менее 1 изделия в секунду. Также необходимо обеспечить заданную глубину гравирования, не превышающую допустимых значений, и качество формирования маркировки, позволяющее уверенно считывать кодирующую информацию промышленными считывателями в условиях полевой эксплуатации.

Гильза представляет из себя полый цилиндр, изготовленный из стали с покрытием или алюминиевого сплава, что требует применения мощного лазера с длиной волны 1 мкм. Размеры гильзы диаметром 7-8 мм и длиной от 50 до 100 мм, а также технологические особенности изготовления детонатора ограничивают возможную область маркировки прямоугольником размером 2x20 мм², что позволяет разместить лишь некоторые виды машиночитаемых кодов и дублирующую символьную информацию для визуального считывания. Одним из вариантов является использование одномерного штрих-кода [147], преимуществами которого являются высокая надежность, устойчивость к механическим повреждениям и разнообразие стандартных средств считывания. К его недостаткам можно отнести относительно низкую информационную плотность, из-за чего маркировка такого кода занимает практически всю отведенную область и разместить дополнительную символьную информацию приемлемого размера становится невозможно. Использование двумерного кода, например, Data Matrix [148], за счет его более высокой информационной плотности позволяет разместить на выделенной площади кодирующую и символьную информацию, однако требования к точности его нанесения намного выше. Для задач маркировки гильз достаточно кода размером 8x32 элементов, который может кодировать до 13 символов и имеет уровень коррекции ошибок 25%. Исходя из высоты возможной области маркировки 2 мм, размер единичного элемента кода, представляющего собой заполненный однородной штриховкой квадрат или окружность, составит порядка 0,2x0,2 мм², а расстояние между элементами ~50 мкм, следовательно, относительная ошибка его позиции не должна превышать 10

мкм. Для создания элементов такого размера максимальный диаметр сфокусированного лазерного пятна должен составлять не более 20 мкм. Суммарный пробег лазерного пучка при нанесении кода, состоящего из 200 элементов, составит порядка 500-600 мм, а при дублировании штрих-кода символьной информацией – до 1000 мм. Исходя из времени, отведенного на обработку одной гильзы, скорость развертки лазерного пучка должна составлять не менее 0,5 м/с. Такая скорость перемещения пучка по сложной траектории при высокой мощности лазерного источника обуславливает применение сканирующего модуля на основе гальванометрических дефлекторов.

С учетом сформулированных требований к точности и производительности создано автоматизированное устройство для промышленной лазерной маркировки гильз детонаторов, изображение которого представлено на рисунке 4.7.

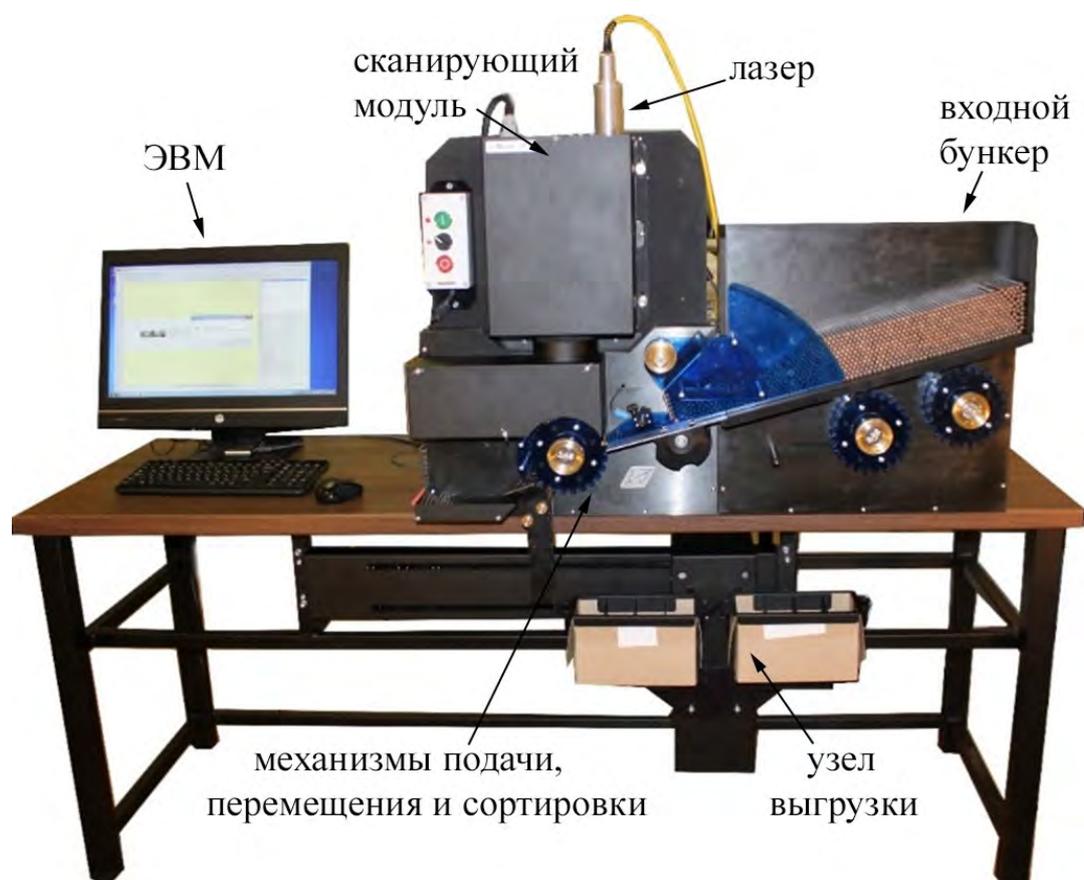


Рисунок 4.7 Устройство промышленной лазерной маркировки гильз детонаторов

В процессе обработки гильзы, вручную помещенные во входной бункер, последовательно проходят через механизмы подачи, перемещения (где

выполняется маркировка и контроль ее качества), сортировки и узел выгрузки, откуда попадают в специализированную тару. Внешний вид электромеханической части устройства показан на рисунке 4.9.



Рисунок 4.8 Внешний вид электромеханической части устройства

Механизм подачи приводится в движение по сигналу датчика наличия изделия в зоне подачи и перемещает гильзы из входного бункера в накопитель для последующего захвата ротором механизма перемещения. На валу двигателя механизма подачи установлен датчик углового положения для контроля его состояния.

Далее с помощью роторного механизма перемещения каждая гильза последовательно устанавливается в фиксированные позиции маркировки, контроля и выгрузки. На оси ротора установлен датчик углового положения ротора с разрешением 2×10^5 угловых положений (что при диаметре ротора 125 мм соответствует линейному разрешению ~ 20 мкм, который используется для контроля положения гильзы в процессе маркировки, а также автоматического приведения механизма в рабочее состояние после сбоя. Применение для перемещения изделий зубчатого колеса с формой отверстия между зубцами, соответствующего диаметру гильз, позволяет осуществлять их точное

позиционирование в фокусной плоскости объектива сканирующего модуля. Устройство комплектуется тремя сменными роторами для различных типоразмеров обрабатываемых изделий. Маркировка выполняется только при наличии гильзы в текущей позиции, что проверяется по сигналам от соответствующего датчика.

Для нанесения маркировки над соответствующей позицией ротора механизма перемещения установлен сканирующий модуль, в состав которого входят два гальванометрических дефлектора СТ6240 (Cambridge Technology, Inc., США) с цифровым драйвером и фокусирующий объектив с полем записи размером до 50×50 мм² и диаметром лазерного пятна в фокусе 20 мкм. В качестве источника излучения использован волоконный лазер ИЛМИ 1-50 со средней выходной мощностью 50 Вт.

Гильза с нанесенной маркировкой перемещается в позицию контроля, где поверхность изделия освещается специальным осветителем и с помощью встроенного контрольного считывателя выполняется чтение нанесенного штрих-кода. После выполнения маркировки и контроля, гильза направляется в механизм сортировки. В зависимости от результатов контроля шторка механизма принимает одно из двух фиксированных положений, и гильза направляется в узел выгрузки либо в бункер бракованных изделий. Гильза также будет направлена в брак, если перед этим она не была обнаружена датчиком наличия в зоне маркировки. Прошедшие контроль изделия с помощью узла выгрузки в автоматическом режиме упаковываются в специально предназначенную тару.

С точки зрения управления устройство маркировки представляет собой комплементарную систему позиционирования с «низкоинерционным» гальванометрическим сканирующим модулем и роторным механизмом перемещения в качестве «высокоинерционного» сканера со следующей структурой (рисунок 4.9).

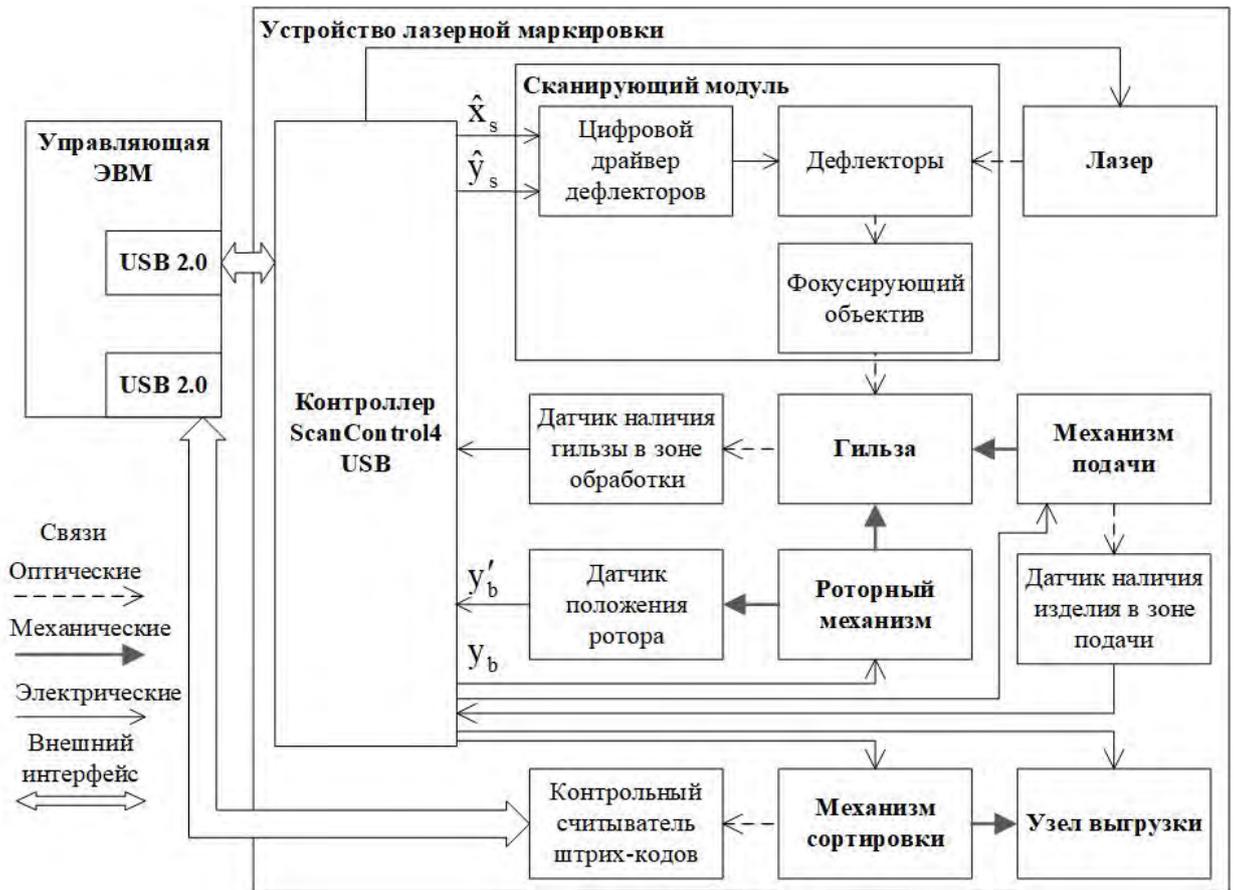


Рисунок 4.9 Структура системы управления устройства микроперфорации

Для управления электромеханической частью устройства, обработки сигналов обратной связи с датчиков и обмена информацией с внешней ЭВМ (прием команд и данных, передача информации о состоянии системы и ошибках) использован встроенный контроллер ScanControl v4.

Исполняемое на внешней ЭВМ СПО «Марк И-14» [32] позволяет установить параметры обрабатываемой гильзы – диаметр, длину, положение зоны, предназначенной для нанесения маркировки, выбрать тип наносимой информации, ее объем (количество и тип символов), местоположение и параметры обработки, а также выполняет функции подготовки данных для маркировки, управления системой, ведения базы данных изготовленных изделий. Формируемый штрих-код может содержать следующую информацию: код завода-изготовителя, дату и время изготовления, порядковый номер маркирующего оборудования, серийный номер изделия (рисунок 4.10).

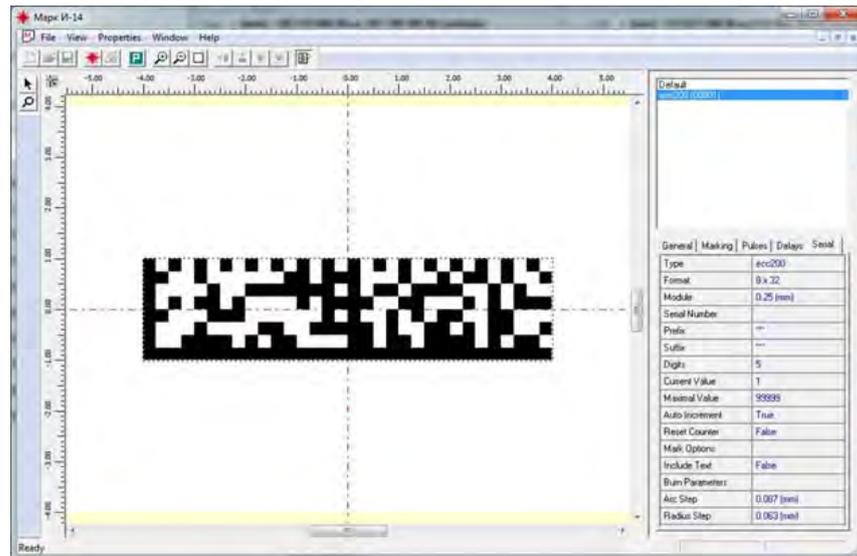
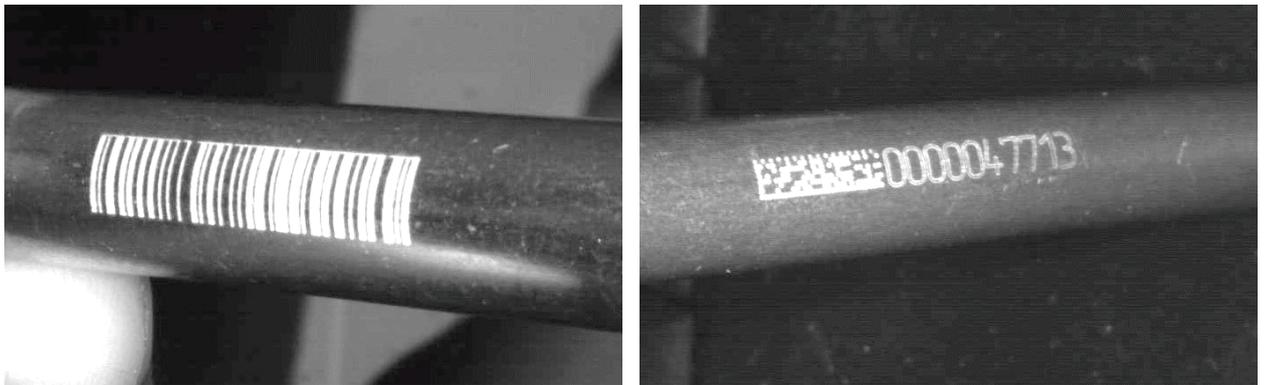


Рисунок 4.10 Рабочее окно СПО «Марк И-14» с кодом Data Matrix

В процессе отладки системы выяснилось, что для обеспечения устойчивого считывания отмаркированного штрих-кода внутренняя площадь каждого из его единичных элементов должна быть заполнена, что требует маркировки не менее 4 вложенных контуров, а максимальная скорость записи не должна превышать 1,2 м/с при средней мощности лазерного излучения 30 Вт. Маркировка кода Data Matrix с дублированием символьной информацией при таких параметрах системы занимает ~800-900 мс. Поскольку длительность перемещения зубчатого колеса из позиции в позицию и окончания его колебаний, составила ~600 мс, то общее время обработки одного изделия превысило допустимое значение на 400-500 мс. Для достижения требуемой производительности решено выполнять маркировку до окончания перемещения роторного механизма. Для этого в соответствии с алгоритмами, подробно рассмотренными в (глава 2, параграф 2.2) по данным от датчика смещения гильзы $\Delta y'_b$ относительно текущей заданной позиции выполняется коррекция текущей координаты положения пучка в поле обработки сканирующего модуля. Для полученных таким образом координат пучка производится вычисление значений управляющих воздействий \hat{x}_s , \hat{y}_s , учитывающих геометрические искажения сканирующей системы и соответствующих результирующему положению лазерного пучка в поле обработки объектива.

Использование в устройстве алгоритма коррекции статических искажений, вносимых компонентами оптической системы позволило обеспечить точность позиционирования элементов маркировки не хуже 10 мкм. Благодаря реализации динамической коррекции положения лазерного пучка в поле записи сканирующего модуля в зависимости от ошибки позиционирования обрабатываемого изделия, определяемой по сигналу обратной связи с датчика положения ротора, производительность устройства составила не менее 3000 изделий в час для кода Data Matrix 8x32 с дублированием символьной информацией. Маркировка опытной партии алюминиевых (рисунок 4.11а) и стальных омедненных (рисунок 4.11б) гильз различного диаметра, выполненная в ходе опытной эксплуатации устройства показала ее соответствие поставленным требованиям.



а

б

Рисунок 4.11 Гильзы детонаторов с нанесенным штрих-кодом (Code 128) и двумерным кодом (Data Matrix, ECC 200) с символьным дублированием

Созданное оборудование дает возможность маркирования всей необходимой номенклатуры средств взрывания (СВ) штрих-кодовой и цифровой идентификацией, обеспечивающей компьютеризированный учет СВ путем считывания простейшими считывающими устройствами, а, следовательно, и безопасность, надежность идентификации и низкие затраты потребителя на оборудование, по компьютеризации учета расходуемых СВ. На момент написания диссертации на АО «Новосибирский механический завод «Искра» было поставлено три устройства лазерной маркировки, с помощью которого обработано более 50 миллионов гильз детонаторов.

4.3 Система микрообработки субмикронного разрешения на основе фемтосекундного лазера

В течение многих десятков лет для формирования оптических шкал, сеток и лимбов деталей оптических приборов использовался метод, при котором на их поверхность наносился тонкий слой воска, затем часть его удалялась вручную по трафарету с помощью специализированного механического пантографа и выполнялось химическое травление стекла. Однако возросшие в последнее время требования к точности, воспроизводимости и разрешению элементов подобных изделий потребовали разработки новых методов обработки. Например, топологические элементы современных датчиков и прицельных сеток должны представлять из себя микроканалы шириной 5-100 мкм, глубиной 3-10 мкм, с шероховатостью края менее 20 нм, при этом обязательным требованием является отсутствие микротрещин и сколов после обработки [149]. С появлением пико- и затем фемтосекундных мощных промышленных лазеров казалось, что проблема микрообработки материалов, таких как стекло и керамика, с помощью лазерного формообразования имеет простое технологическое решение [150]. Так как тепловые процессы, возникающие при фемтосекундной обработке, сведены к минимуму, то можно избежать появления микросколов и трещин, возникающих при обработке таких материалов лазерами с наносекундной (и более) длительностью импульса. Однако оказалось, что даже при воздействии лазерных импульсов фемтосекундной длительности отсутствие дефектов может быть достигнуто лишь в случае оптимального выбора режима микрообработки [151].

Еще одной проблемой применения технологии фемтосекундной микрообработки в серийном оптическом производстве являются обеспечение заданной точности для больших объектов. Так, для фокусирующих объективов с диаметром сфокусированного пятна менее 5 мкм размер поля обработки не превышает 10x10 мм, а глубина фокусировки составляет сравнима с диаметром пятна и составляет в лучшем случае десятки микрон. В то же время существует необходимость прецизионной (ошибки обработки 1 мкм) микрообработки изделий размерами до 200×200 мм² с перепадами рельефа поверхности в несколько сотен

микрон при сохранении высокой производительности (скорость перемещения пучка до 1 м/с). Для выполнения таких требований возможно использовать комплементарную систему позиционирования лазерного пучка, однако для этого необходимо создание специальных алгоритмов управления, аппаратного и программного обеспечения, обеспечивающих нужную точность совмещения соседних полей записи, средств автоматического позиционирования и фокусировки лазерного излучения в плоскости обработки и новых технологических режимов обработки.

Для обработки с микронной точностью оптических деталей разработана трехканальная (1030, 515 и 343 нм) фемтосекундная лазерная рабочая станция «ФПЛ», внешний вид которой без защитных кожухов показан на рисунке 4.12.

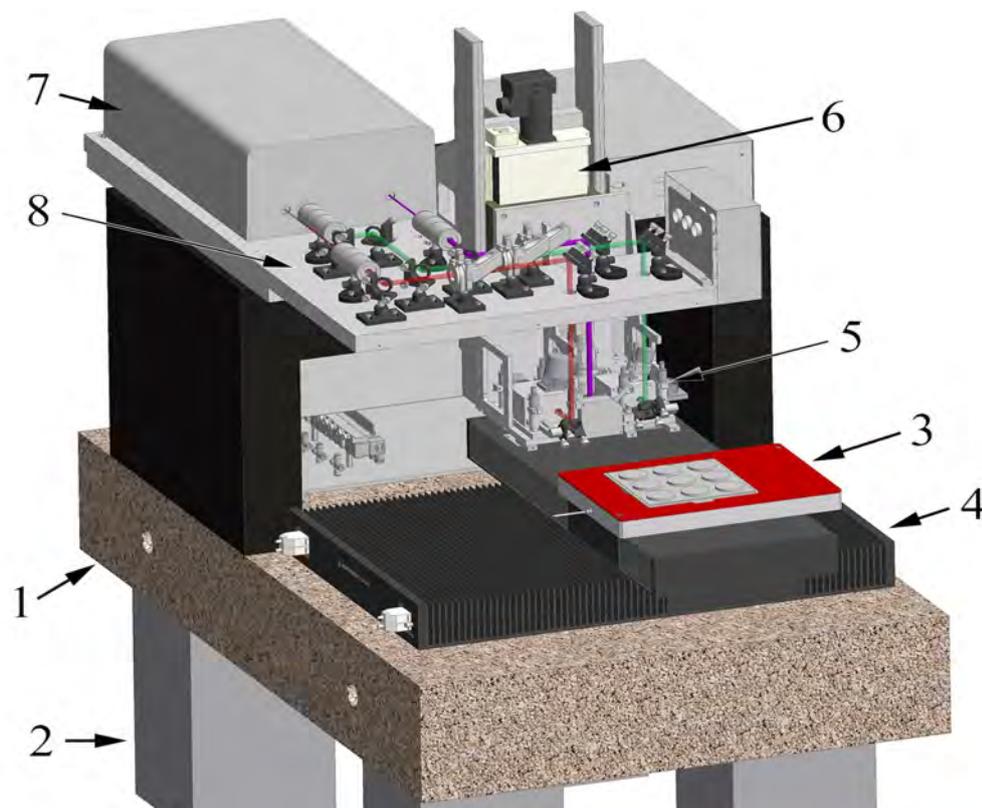


Рисунок 4.12 Система микрообработки «ФПЛ»

Оптико-механический модуль системы собран на гранитной плите (рисунок 4.12, поз. 1) и установлен на виброизолирующее основание (рисунок 4.12, поз. 2). Обрабатываемое изделие устанавливается и закрепляется вакуумным прижимом на предметном столе (рисунок 4.12, поз. 3), расположенном на подвижной каретке блока двухкоординатного позиционирования с воздушными подшипниками

(рисунок 4.12, поз. 4). Исходная CAD-модель формируемого объекта преобразуется с помощью специального программного обеспечения в задание на обработку с установленными технологическими параметрами и передается в контроллер системы. На первом этапе выполняется автоматическое перемещение изделия в зону обработки с помощью блока двухкоординатного позиционирования и изменение положения оптической головки (рисунок 4.12, поз. 5) с помощью механизма вертикального перемещения (рисунок 4.12, поз. 6) такое, чтобы обрабатываемая поверхность материала находилась от нее на расстоянии, близком к рабочему. Затем в полуавтоматическом режиме осуществляется точное совмещение задания на обработку и обрабатываемого изделия по горизонтальному положению и углу поворота. Далее выполняется измерение расстояния до обрабатываемого изделия.

По окончании подготовительных процедур запускается процесс обработки. Излучение лазерного источника (рисунок 4.12, поз. 7, «Pharos» компании «Light Conversion») с длиной волны, выбранной в зависимости от обрабатываемого материала, проходя через расширитель пучка с помощью согласующих зеркал из блока лазера (рисунок 4.12, поз. 8) поступает в оптическую головку (рисунок 4.13).

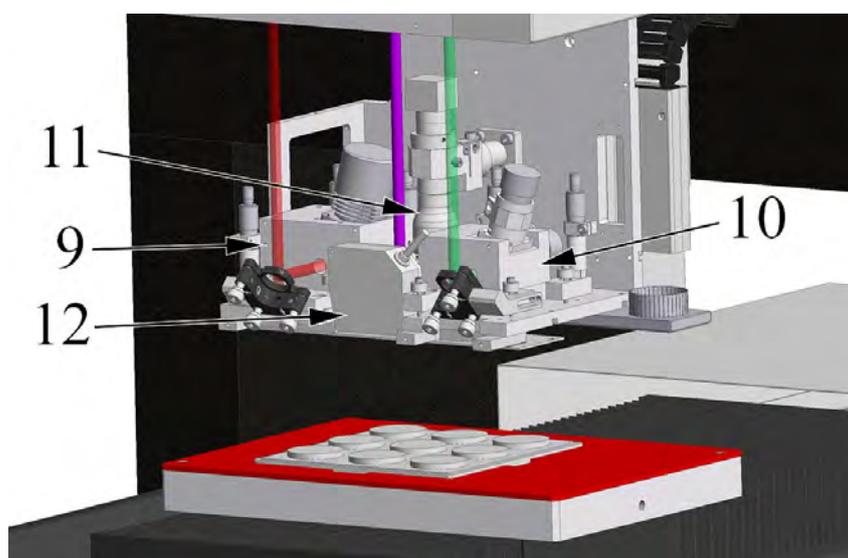


Рисунок 4.13 Оптическая головка системы микрообработки «ФПЛ»

Лазерный пучок попадает в гальванометрические сканирующие модули (рисунок 4.13, поз. 9 или поз. 10), предназначенные для сканирования излучения с длиной волны 1030 нм и 515 нм, либо в осевой объектив для фокусирования излучения

третьей гармоники и фокусируется на поверхности материала. Оптическая головка также содержит также модуль технического зрения (рисунок 4.13, поз. 11), предназначенный для совмещения задания и обрабатываемого изделия, а также визуализации результатов обработки, и датчик фокуса (рисунок 4.13, поз. 12), используемый для измерения расстояния от оптической головки до поверхности изделия. В процессе обработки происходит перемещение изделия в заданную позицию, соответствующую первому программно-определенному элементу формируемого объекта и выполняется его обработка. Максимальный размер элемента определяется полем обработки фокусирующего объектива используемого сканирующего модуля. Если общая площадь обработки, определенная заданием, превышает размер поля обработки объектива, происходит последовательное перемещение изделия к следующим элементам с помощью блока двухкоординатного позиционирования.

Схема управления системой показана на рисунке Рисунок 4.14.

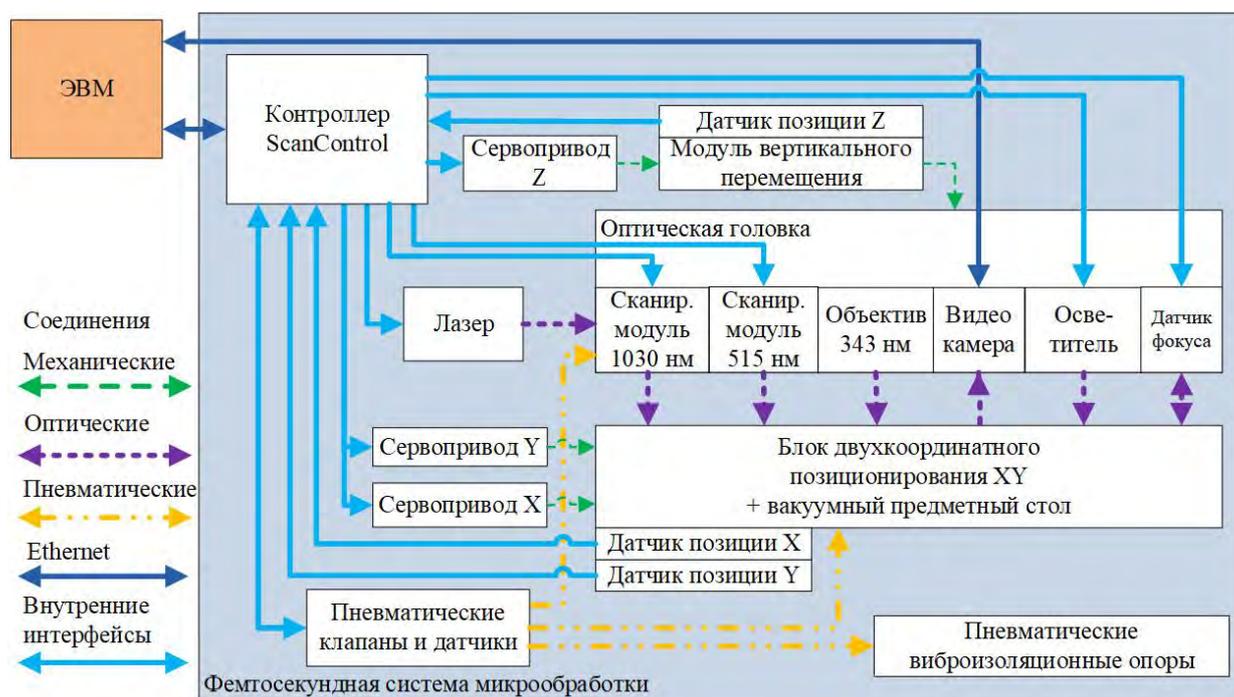


Рисунок 4.14 Структура управления системы «ФПЛ»

Управление всеми узлами системы и их синхронизация осуществляется с помощью контроллера ScanControl, соединенного по интерфейсу Ethernet с внешней ЭВМ. В контроллере для использовано специальное программное обеспечение для

встроенного процессора ARM [34] (см. главу 3, параграф 3.2), а также следующие программные блоки для ПЛИС: управления сканирующими модулями с двухступенчатой коррекцией искажений оптического тракта (глава 3, параграф 3.3.1), управления лазерным излучателем (глава 3, параграф 3.3.2), управления сервоприводами с BLDC двигателем (с табличной коррекцией ошибок позиционирования), а также вспомогательные блоки управления пневматическими клапанами, сбора и обработки данных с датчиков фокуса, положения сервоприводов, давления подаваемых газов, температуры и влажности окружающей среды. Обеспечение заданных требований по точности требует калибровки оптического тракта системы, процесс и результаты которой для устройства «ФПЛ» описаны в главе 2, параграф 2.1.

CAD-модель формируемого объекта подготавливается в графическом редакторе или системе автоматического проектирования и может быть представлена в виде трехмерной модели в формате STL или в виде контуров обрабатываемого изделия и микроканалов в формате DXF. Импорт и визуализация CAD-модели, подготовка данных для реализации метода растрового заполнения контуров, установка режимов микрообработки – частоты лазерного излучения, скорости перемещения лазерного пучка, стратегии перемещения лазерного пучка и других параметров выполняется при помощи СПО ФПЛ [31], исполняемого на управляющей ЭВМ. Представление формируемых объектов в формате STL позволяет формировать 2,5D рельеф, для этого при импорте выполняется послойное разделение импортируемой модели с заданным шагом по вертикали; далее каждый сформированный слой рассматривается как отдельный контурный объект (рисунок 4.15).

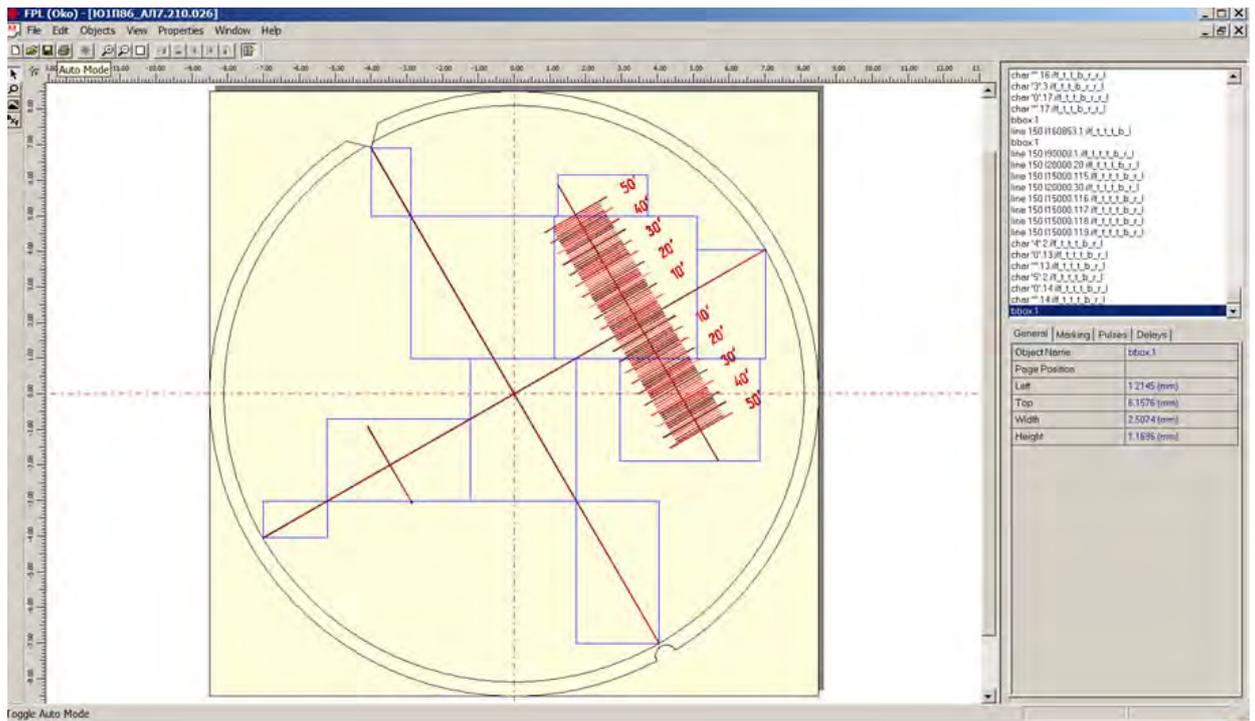
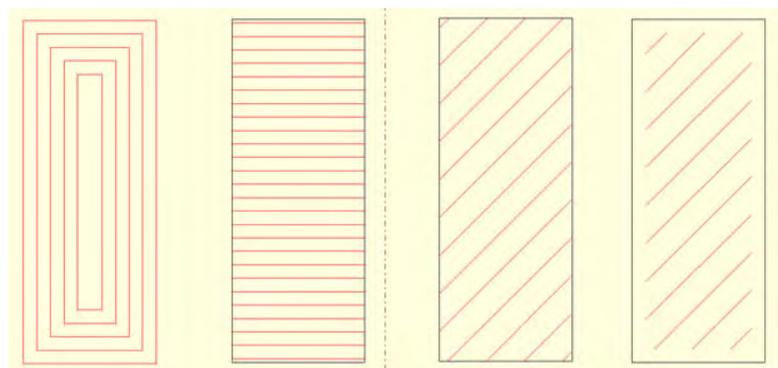


Рисунок 4.15 Рабочее окно СПО «ФПЛ»

При подготовке задания полученный контурный объект делится на элементы (на рисунке показаны синими квадратами) с размером, равным полю обработки сканирующего модуля.

При импорте САД-модель в СПО определяется стратегия перемещения пучка – растровое заполнение растровыми линиями с заданным шагом и углом или вложенными контурами (рисунок 4.16).



а

б

в

г

Рисунок 4.16 Стратегии перемещения для прямоугольного микроканала: (а) – заполнение вложенными контурами, заполнение растровыми линиями (б) – под углом 90° , (в) – под углом 45° , (г) – под углом 45° с отступом от границ

Для каждого отдельного формируемого микроканала помимо угла и шага растра СПО позволяет задать такой параметр, как отступ растра от границы и осуществить дополнительный обход лазерным пучком вдоль границы микроканала.

Точное совмещение САD-модели формируемого объекта и обрабатываемой подложки по положению выполняется с помощью модуля технического зрения (рисунок 4.17).

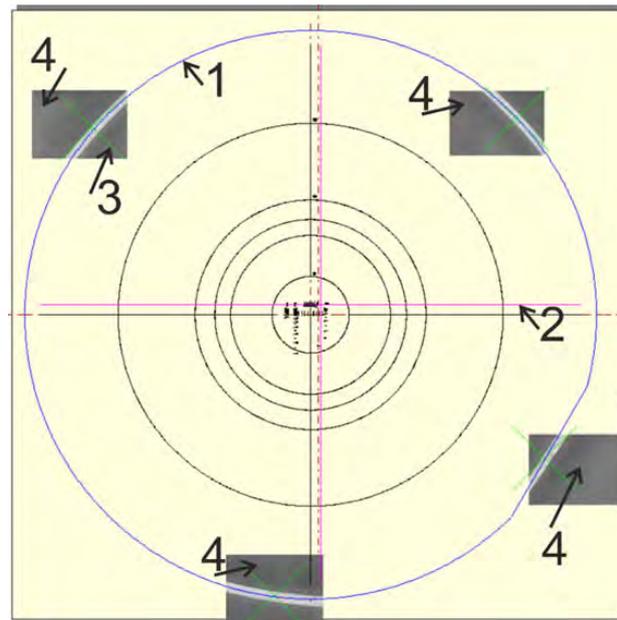


Рисунок 4.17 Совмещение координат модели формируемого объекта и подложки по данным модуля технического зрения

Импортированная в СПО САD-модель изделия для выполнения совмещения должна содержать изображение его контура (рисунок 4.17, поз. 1) и маркеры координат для фотосъемки участков изделия (рисунок 4.17, поз. 3). Изображения фрагментов подложки (рисунок 4.17, поз. 4), полученные с помощью модуля технического зрения в координатах маркеров, накладываются на импортированную модель объекта, после чего осуществляется перенос и поворот модели.

Для выполнения автоматической фокусировки осуществляется измерение расстояния до обрабатываемой поверхности изделия с помощью встроенного датчика фокуса в заданных точках. Местоположение точек фокусировки задается путем нанесения линий (рисунок 4.17, поз. 2) в пределах контура подложки на этапе проектирования САD-модели изделия и определяется ее особенностями, например,

положением технологических отверстий, формой и т.п. По полученным измерениям вычисляется вектор нормали поверхности подложки, который используется далее в процессе обработки для расчета скорректированного значения \hat{z}_b вертикальной позиции оптической головки в зависимости от текущей горизонтальной позиции изделия.

Поиску оптимального режима обработки для системы позиционирования пучка на основе гальванометрических дефлекторов посвящена работа [27], где в ходе экспериментов был определен диапазон соотношений между частотой модуляции лазера, энергией импульса и скоростью перемещения лазерного пучка, позволяющий обрабатывать стеклянные подложки без дефектов. Представленная в работе экспериментальная модель показывает, что для протяженных структур с длиной непрерывного перемещения лазерного пучка 1 мм и более возможно достижение нужного качества микроканала и производительности микрообработки 0,03 мм³/мин при энергии импульса 0,91-2,27 мкДж, перекрытии соседних импульсов 53-62% и количестве повторных проходов более 3. Микрообработка выполняется методом векторного перемещения сфокусированного лазерного пучка по эквидистантным траекториям, образованным вдоль его границ. Однако такой метод развертки имеет ряд ограничений при изготовлении объектов с большим количеством микроканалов с линейными размерами 0,1 мм и менее, например, шкал, лимбов для оптических приборов.

Так при использовании векторного перемещения пучка при формировании микроканалов с линейными размерами порядка 0,1 мм суммарное время задержек, обеспечивающих точность обработки (см. главу 1, параграф 1.2.4), становится существенно больше времени обработки, что приводит в итоге значительному падению производительности. Например, для микроканала размером 100×20 мкм² при использовании режима, приведенного в [27], с линейной скоростью развертки пучка 87,5 мм/с производительность падает до 0,005 мм³/мин. Для повышения производительности (увеличения глубины обработки за 1 проход) требуется увеличение мощности лазерного излучения в несколько раз, что приводит к

развитию различных видов дефектов (рисунок 4.18) в виде трещин (рисунок 4.18б) и сколов (рисунок 4.18в) на краях микроканала и на его дне (рисунок 4.18г).

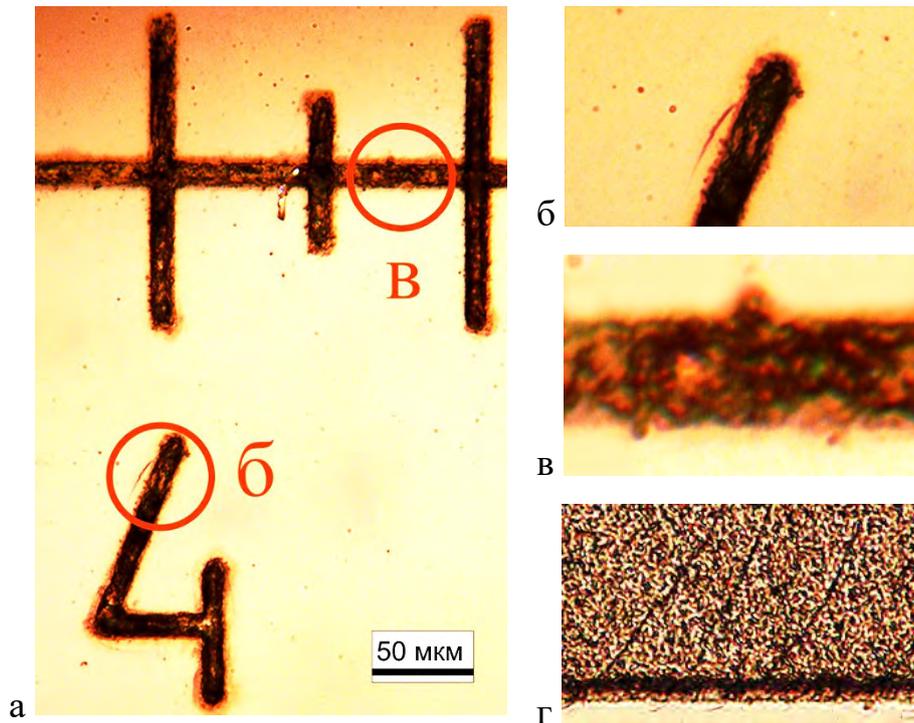


Рисунок 4.18 Микродефекты, образующиеся при векторном перемещении лазерного пучка (микроскоп Leika DM IRB, объектив 40х)

Другим ограничением векторного перемещения пучка является появление трещин вдоль направления перемещения лазерного пучка во время записи длинных линий (рисунок 4.19). Максимальная длина линии без дефектов в виде микротрещин зависит от вида и качества обрабатываемого материала, динамических и энергетических характеристик лазерного пятна в фокусе, типичное ее значение 100-150 мкм для стекла К8, при скорости движения пучка 28 мм/с, размере пятна 5 мкм, частоте следования импульсов 50 кГц, энергии в импульсе 3 мкДж.

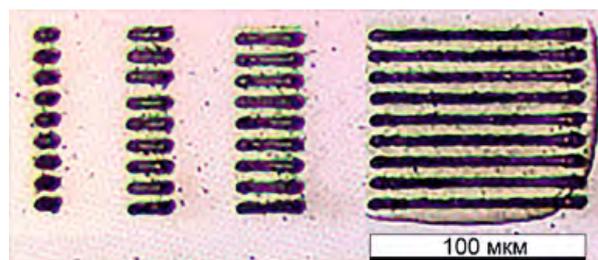


Рисунок 4.19 Трещины, развивающиеся вдоль направления движения пучка при векторном перемещении (микроскоп Leika DM IRB, объектив 40х)

На рисунке 4.19 показан ряд линий длиной 10, 20, 30 и 100 мкм, записанных на поверхности стеклянной подложки векторным способом с одинаковыми параметрами. Видно, что на линии длиной 100 мкм развивается трещина, что связано с возникновением термических напряжений в обрабатываемой подложке вдоль движения лазерного пучка.

Для достижения требуемых скоростных характеристик при сохранении качества обработки предложен новые способы управления положением лазерного пучка [29, 30], основанные на растровой его развертке, при которых дефлекторы могут работать при максимальных скоростях и при этом дополнительные задержки для обеспечения точности движения не требуются. Схематичное изображение структуры растрового заполнения при записи микроканала показано на рисунке 4.20а, а фотография элемента записи слоя микроканала с таким заполнением без перекрытия – на рисунке 4.20б.

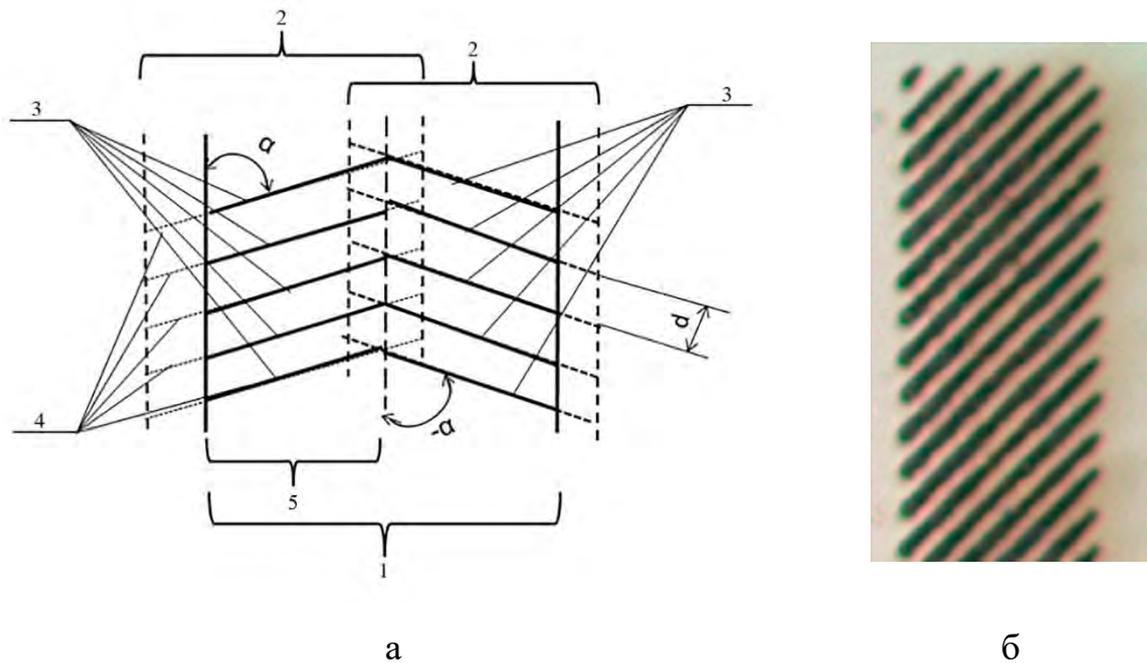


Рисунок 4.20 Растровый метод формирования микроканалов: (а) схема, (б) фотография микроканала с растровым заполнением

Микроканал 1 формируется путем однократного или многократного сканирования пучка растровым способом в пределах строки 2, которая состоит из участков микрообработки 3, обрамленных с двух концов зонами холостого хода 4. Первый лазерный импульс излучается на одной границе участка микрообработки, а

последний - на другой его границе, длина участка микрообработки в каждой строке устанавливается меньше предельной длины, поэтому в этом случае микросколы и микротрещины не возникают. Зоны холостого хода, длина которых составляет 5-25% от длины участка микрообработки, необходимы для выхода зеркал дефлекторов на рабочую угловую скорость (режим обработки на ходу, описанный в пункте 1.3.3 главы 1). Это позволяет обеспечить равномерное распределение лазерных импульсов на всех участках участка микрообработки, избежать образования дефектов в его начале и конце.

Сканирующий модуль осуществляет развертку лазерного пучка по одной или более растровым зонам микрообработки S под углом растра α относительно образующей в каждой точке одного из контуров растровой зоны микрообработки. При этом расстояние d между строками не превышает их ширину, а угол растра α лежит в пределах от 35° до 90° . Изменение угла растра случайным образом в указанных пределах при повторной обработке позволяет сгладить образованные при предыдущих этапах обработки неровности в виде периодических структур и, таким образом, уменьшить шероховатость поверхности микроканала, в том числе при послойном формировании микроканала требуемой глубины с перефокусировкой лазерного пучка в плоскости микрообработки. Для дополнительного повышения качества микрообработки и улучшения прямоугловности профиля микроканала возможно также изменение пиковой мощности нескольких начальных и конечных лазерных импульсов в строке.

Совокупность примененных метода калибровки, алгоритмов коррекции статических и динамических искажений сканирующей системы, программно-аппаратных решений позволила создать устройство со следующими характеристиками:

- максимальный размер поля обработки – $200 \times 200 \times 100$ мм³;
- разрешение системы позиционирования обрабатываемого объекта – 50 нм;
- рабочее поле записи сканирующего модуля – 5×5 мм²;
- рабочая скорость перемещения пучка – до 1 м/с;

- абсолютная точность на поле записи $200 \times 200 \text{ мм}^2 - \pm 1 \text{ мкм}$;
- минимальная ширина микроканала – 4 мкм.

Технические характеристики системы подтверждены в процессе изготовления нескольких сотен опытных образцов различных изделий, изображения некоторых из них представлены на рисунке 4.21.

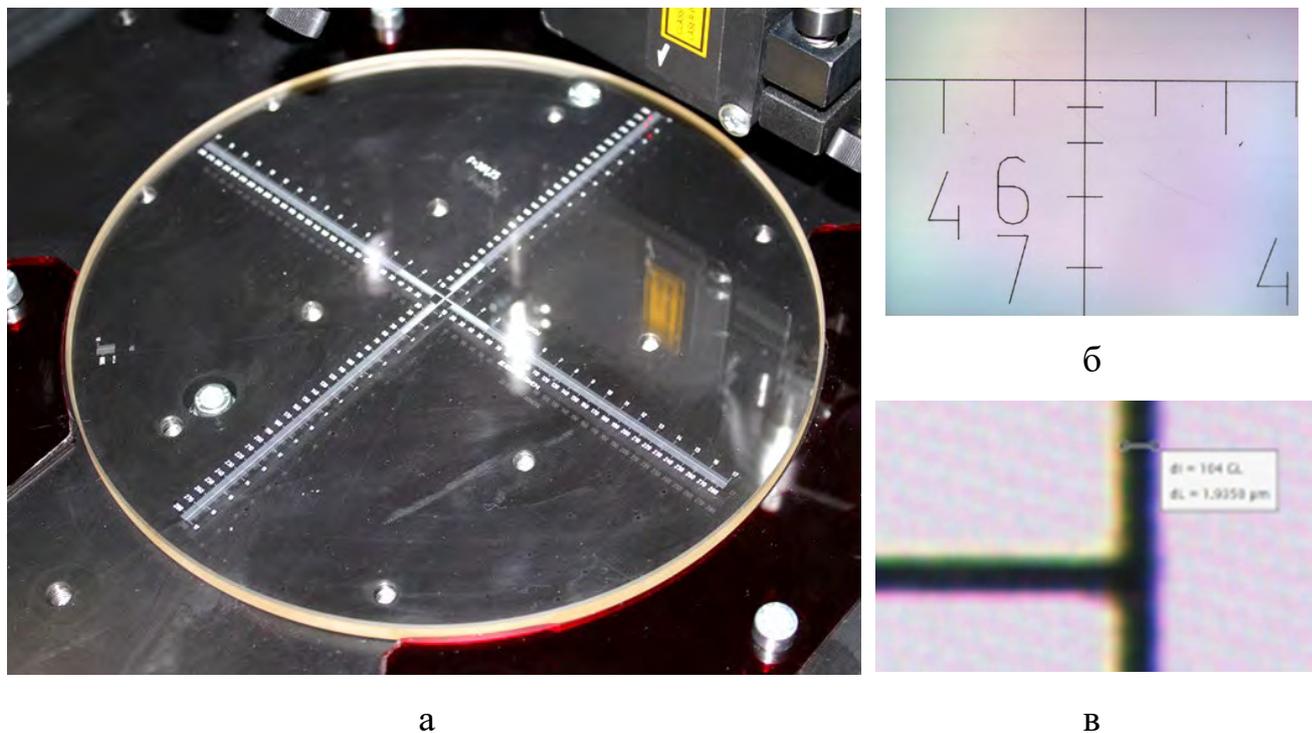


Рисунок 4.21 Обработанные оптические изделия: (а) оптическая шкала, диаметр 200 мм, ширина штрихов $30 \pm 8 \text{ мкм}$, точность расположения штрихов в центральной зоне ($15,5 \times 31,5 \text{ мм}^2$) относительно начала координат $\pm 1 \text{ мкм}$. (б) фрагмент сетки, ширина штриха 2 мкм, точность расположения штрихов $\pm 0,5 \text{ мкм}$, (в) ее увеличенная часть

Использование предложенных растровых способов развертки лазерного пучка позволило увеличить производительность микрообработки для микроканала размерами $100 \times 20 \text{ мкм}^2$ в 5 раз до $0,025 \text{ мм}^3/\text{мин}$ при следующих параметрах лазерного источника: частота следования импульсов 476 кГц, энергия в импульсе 0,9 мкДж [152]. Так, для сетки с линейными размерами $190 \times 190 \text{ мм}^2$, наносимой на стеклянной подложке диаметром 200 мм (рисунок 4.21б), при глубине обработки 7 мкм общий объем удаляемого материала составляет $1,8 \text{ мм}^3$. Общая длительность обработки, включающая время перемещения предметного стола, вертикального

привода, для такой сетки составила 3 часа, а чистое время лазерной обработки с растровым заполнением контуров – 1,5 часа, что соответствует производительности обработки $0,02 \text{ мм}^3/\text{мин}$. Изготовление аналогичной сетки с использованием векторного режима обработки составляет 7 часов, т.е. чистое время лазерной обработки сократилось в 3,6 раза.

В ходе опытной эксплуатации системы также продемонстрировано отсутствие микродефектов подложки при формировании микроканалов методом растровой развертки лазерного пучка (рисунок 4.22).

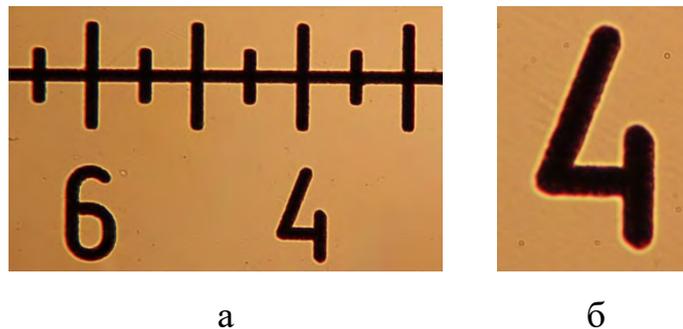


Рисунок 4.22 Изображение (а) части оптической шкалы, изготовленной при растровой развертке пучка, (б) ее фрагмента, ширина микроканала $12,5 \text{ мкм}$, глубина – 10 мкм

Использование многоканального лазерного источника и соответствующих сканирующих модулей позволило также осуществлять прецизионную микрообработку различных металлических материалов (рисунок 4.23).

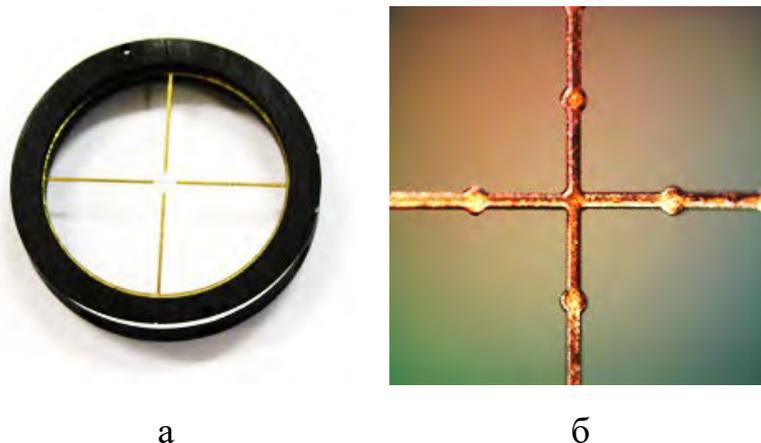


Рисунок 4.23 Пример микрообработки медной фольги

На рисунке 4.23а представлено изображения детали диаметром 20 мм, вырезанной из медной фольги толщиной 100 мкм, на рисунке 4.23б – ее центральная часть, ширина элементов перекрестья – 20 мкм.

Созданное оборудование по техническим характеристикам и функциональным возможностям не уступает известным зарубежным системам аналогичного назначения компаний Oxford lasers (Великобритания) [153] и Workshop of Photonics (Литва) [154]. Лазерная рабочая станция «ФПЛ» успешно используется для микрообработки заготовок из оптического стекла на АО "Новосибирский приборостроительный завод", подобная ей одноканальная система – на АО «Вологодский оптико-механический завод». За разработку системы коллективу авторов ИАиЭ СО РАН и АО «НПЗ» присуждена Государственная премия Новосибирской области. Использование данных систем позволило предприятиям выполнять нанесение микроканалов на большую часть номенклатуры выпускаемых изделий лазерным способом, что в свою очередь дало возможность уйти от трудоемкого многостадийного процесса, многократно уменьшить время выполнения операции и исключить использование агрессивных и высокотоксичных химикатов.

4.4 Выводы по четвертой главе.

1. Модульный принцип построения разработанного программного обеспечения для встроенных микроконтроллеров и ПЛИС позволяет адаптировать созданные контроллеры для применения в различных устройствах лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования как научного, так и промышленного назначения.

2. Впервые предложены и реализованы на практике способы формирования микроканалов на подложках из оптического стекла, оптических кристаллов и полупроводниковых материалов фемтосекундными импульсами лазерного излучения, обеспечивающие отсутствие микродефектов в виде микросколов и микротрещин на поверхности подложек и микроканалов, а также

внутри подложек при более высокой производительности по сравнению с ранее предложенными.

3. Применение разработанных алгоритмов и программно-аппаратных средств позволило создать ряд лазерных систем с комплементарной системой позиционирования, сопоставимых по точности и скорости обработки с лучшими мировыми аналогами.

Заключение

В работе получены следующие результаты.

1. Предложен метод коррекции статических искажений, вносимых компонентами оптической схемы устройств лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования, основанный на использовании робастного двухшагового алгоритма обработки растровой профилометрической карты, полученной при тестовой записи с помощью их сканирующего модуля. На первом шаге координаты реперных точек полагаются соответствующими координатам максимумов суммарной глубины по строкам и по столбцам карты. На втором шаге выделяются фрагменты с центром в найденных точках и корреляционным методом определяются точные значения их координат, по которым формируется калибровочная таблица. Использование итерационной коррекции управляющих воздействий гальванометрического сканирующего модуля методом кусочно-планарной интерполяции по полученной калибровочной таблице обеспечивает позиционирование лазерного пучка с относительной погрешностью до $\delta \sim 10^{-5}$.
2. Предложен метод компенсации динамических ошибок позиционирования электромеханических приводов «высокоинерционного сканера» по сигналам от датчиков положения и данным калибровки «низкоинерционного» сканера, позволяющий для устройств лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования увеличить производительность без потери точности, а также осуществлять обработку при непрерывном перемещении «низкоинерционного» сканера относительно обрабатываемого материала. Использование математического моделирования системы управления гальванометрическим дефлектором для определения коэффициентов корректирующего блока позволяет обеспечить эффективную настройку устройства микрообработки и избежать проведения большого числа физических экспериментов и измерений.

3. Разработан комплекс программно-аппаратных средств, реализующий предложенные методы и алгоритмы управления устройствами с комплементарной системой позиционирования лазерного пучка, не уступающий по своим функциональным возможностям и техническим характеристикам продукции аналогичного назначения ведущих мировых производителей. Модульный принцип построения программного обеспечения для ПЛИС и микроконтроллеров позволяет легко адаптировать созданные решения для управления системами лазерной микрообработки различного назначения.
4. Впервые предложены и реализованы на практике способы управления формированием микроканалов на подложках из оптического стекла, оптических кристаллов и полупроводниковых материалов фемтосекундными импульсами лазерного излучения, обеспечивающие отсутствие микродефектов в виде микросколов и микротрещин на поверхности подложек и микроканалов, а также внутри подложек при более высокой производительности по сравнению с достижимой ранее.
5. Разработанные программные-аппаратные средства использованы в системах лазерной микрообработки для изучения особенностей обработки диэлектрических материалов, микроперфорации органических материалов (НИИ Гознака), промышленной маркировки средств взрывания (ОАО НМЗ «Искра»), микрообработки заготовок из оптического стекла и кристаллов на основе лазера с фемтосекундной длительностью импульсов (АО «НПЗ», АО «ВОМЗ»), а также в ряде других систем научного и производственного назначения.

Список цитируемой литературы

1. Yeo C. Y. et al. A technical review of the laser drilling of aerospace materials //Journal of materials processing technology. 1994. Т. 42. №. 1. С. 15-49.
2. Watson M. Laser drilling of printed circuit boards //Circuit World. 1984. № 11. С. 13-29.
3. Lau J. H., Chang C. An overview of microvia technology //Circuit World. – 2000.
4. Holmes A. S. Laser fabrication and assembly processes for MEMS //Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing VI. International Society for Optics and Photonics, 2001. Т. 4274. С. 297-306.
5. Booth H. et al. Laser Micromachining techniques for industrial MEMS applications //Proc. SPIE. 2005. Т. 5713. С. 190-199.
6. Kay R., Desmulliez M. A review of stencil printing for microelectronic packaging // Soldering & Surface Mount Technology, 2012. Т. 24. № 1. С.38-50.
7. Malek C. Laser processing for bio-microfluidics applications // Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2006. № 385(8). С. 1351–1361.
8. Shin H. et al. Femtosecond laser-inscribed direct ultrafast fabrication of a DNA distributor using microfluidics //Applied Sciences. 2017. Т. 7. №. 10. С. 1083.
9. Dunskey C. Laser material processing in microelectronics manufacturing: status and near-term opportunities //Proc. SPIE, 2005. Т. 5713. С. 200-214.
10. Gattass R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials. // Nature Photonics, 2008. № 2(4). С. 219–225.
11. Mayes K., Markantonakis K. (eds.) Smart cards, tokens, security and applications. Springer, 2017. 531 с.
12. How to personalize a passport: A Comparison of Available Digital Print Personalization Technologies for Passports http://www.datacard.com/downloads/ViewDownload.dyn?elementId=repositories/downloads/xml/govt_wp_personalize_passport.xml&repositoryName=downloads&index=2 (дата обращения: 21.09.2019)

13. Jonušauskas L. et al. Mesoscale laser 3D printing // Optics Express, 2019. Т. 27. № 11. С. 15205-15221.
14. Вейко В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико–технические основы лазерных технологий». Раздел: Лазерная микрообработка. Изд. 2–е, испр. и дополн. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 111 с.
15. F. Arecchi Coherent Optical Engineering. North-Holland, 1977. 366 с.
16. L. Beiser Unified Optical Scanning Technology. Newark, NJ, Wiley. 2005. 201 с.
17. ABL1500-B Series Stage, 2011 URL: http://www.aerotechmotioncontrol.com/ftp/pwpsoftware/manuals_helpfiles/Mechanical/Stages%20Tables%20and%20Slides/ABL1500-B.pdf (дата обращения: 26.02.2020)
18. Aylward R. Advances and technologies of galvanometer-based optical scanners //Optical Scanning: Design and Application. – International Society for Optics and Photonics, 1999. Т. 3787. С. 158-164.
19. Lightning™ II Scan Heads, 2016. URL: <https://www.cambridgetechnology.com/sites/default/files/Lightning%20II%20Scan%20Heads%20-%202-Axis%20Modular.pdf> (дата обращения: 04.10.2019)
20. Scan system intelliSCANde, 2017. URL: <http://www.scanlab.de/sites/default/files/PDF-Dateien/Data-Sheets/Scan-Systems/intelliSCAN-EN.pdf> (дата обращения: 02.10.2019)
21. Rensch C. et al. Laser scanner for direct writing lithography //Applied optics. 1989. Т. 28. №. 17. С. 3754-3758.
22. Goodman F. A., Prentakis A. E. Light beam positioning apparatus : пат. 4685775 США; заявл. 15.11.85; опубл. 11.08.87
23. Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В. Система управления составными двухкоординатными сканаторами // Автометрия. 2007. №1. С. 116-126.
24. Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В., Смирнов К.К. Аппаратно - программные средства динамической коррекции для управления лазерными системами микрообработки на основе комплементарных сканеров // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. №3. С. 48-52.

25. Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В., Смирнов К.К. Особенности управления лазерными системами микрообработки движущихся носителей // Автометрия. 2010. №1. С. 98-106.
26. Полещук А.Г., Кутанов А.А., Бессмельцев В.П., Корольков В.П., Шиманский А.И., Маточкин А.Е., Голошевский Н.В., Макаров К.В., Макаров В.П., Снимщиков И.А., Сыдык уулу Н. Микроструктурирование оптических поверхностей: технология и устройство прямой лазерной записи дифракционных структур// Автометрия. 2010. №2. С. 86-96.
27. V. Bessmeltsev, E. Bulushev, N. Goloshevsky, A. Dostovalov, A. Wolf High-speed and crack-free direct-writing of microchannels on glass by an IR femtosecond laser // Optics and Lasers in Engineering. 2016. Т. 79. С. 39–47.
28. Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В., Кастеров В.В., Киприянов Я.А., Смирнов К.К. Метод калибровки лазерной гальванометрической сканирующей системы субмикронного разрешения// Автометрия. 2018. №4. С. 84-91.
29. Способ и устройство формирования микроканалов на подложках из оптического стекла, оптических кристаллов и полупроводниковых материалов фемтосекундными импульсами лазерного излучения: пат. 2661165 Рос. Федерация: МПК В23 К26/36 (2014.01), В23 К26/062 (2014.01) В23 К26/082 (2014.01). / Никаноров Н.Ю., Рассохин В.А., Баев С.Г., Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В. № 2017137458; заявл. 25.10.2017; опубл. 12.07.2018. Бюл. № 20. 16 с.
30. Способ формирования микроканалов на подложках и устройство для его реализации: пат. 2709888 Рос. Федерация: МПК В23 К26/36 (2014.01). / Баев С.Г., Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В., Катасонов Д. Н., Киприянов Я.А. № 2019108823; заявл. 26.03.2019; опубл. 23.12.2019. Бюл. № 36. 3 с.
31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017610940. Программа для прецизионной обработки оптических элементов (для лазерного формирования сеток, масок, шкал, лимбов) ФПЛ /

- Голошевский Н.В., Смирнов К.К. № 2016662814; Заявл. 24.11.2016; Рег. 19.01.2017
32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017612639. Программа для нанесения графической информации в виде одномерного, двумерного штрих-кода и буквенно-цифрового кода на поверхности изделий методом лазерного гравирования Марк И-14 / Голошевский Н.В., Смирнов К.К. № 2016662844; Заявл. 24.11.2016; Рег. 02.03.2017
33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017613341. Программа для поиска таблицы корректирующих значений для сканирующей лазерной системы по файлу изображения тестовой сетки ScanCorrection / Голошевский Н.В., Смирнов К.К. № 2016662830; Заявл. 24.11.2016; Рег. 15.03.2017
34. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017619142. Программа для контроллера систем лазерной прецизионной обработки оптических элементов ФПЛ_ARM / Голошевский Н.В., Кастеров В.В. № 2017616491; Заявл. 05.07.2017; Рег. 15.08.2017
35. Самарин Ю.Н., Шевченко С.А. Лазерная техника и технология изготовления печатных форм. М.: МГУП, 2009. 142 с.
36. G.F. Marshall Handbook of optical and laser scanning. CRC Press, 2018. 788 с.
37. 3-Axis Scan Head URL: https://www.cambridgetechnology.com/sites/default/files/P-Datasheet%20-%20Scan%20Head%20-%203-Axis%20-%20PS2-LII%20-%20Modular_v14.pdf (дата обращения: 01.11.2019)
38. Галуев С.В., Розов Б.С. Составные сканаторы // Измерения, контроль, автоматизация. 1983. №3. С. 33-39.
39. Выскуб В.Г., Розов Б.С., Савельев В.И. Прецизионные цифровые системы автоматического управления. М.: Машиностроение, 1984. 136 с.
40. Matsumoto H. et al. Laser direct Ablation for Patterning Printed Wiring Boards Using Ultra-fast Lasers and High Speed Beam Delivery Architectures // Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2013. Т. 8. №3. С 315-320.

41. Romer G., Bechtold P. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. // *Physics Procedia*, 2014. Т. 56. С. 29 – 39.
42. Выскуб В. Г. Возможности и ограничения составных сканаторов // *Вопросы радиоэлектроники*. 2018. № 5. С. 74–82.
43. Introduction to acousto-optic modulators and deflectors URL: <https://www.optoscience.com/maker/gooch/pdf/IntroductionAO.pdf> (дата обращения: 03.11.2019)
44. C025: Multi-Band CO₂ High-Reflectivity Coating URL: <https://www.cambridgetechnology.com/sites/default/files/Datasheet%20-%20C025%20Multi-Band%20CO2%20High-Reflectivity%20Coating.pdf> (дата обращения: 04.11.2019)
45. Takeno S. et. al. Laser Drilling of Epoxy-Glass Printed Circuit Boards // *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2009. Т 4. №2. С. 118-123
46. Okada T., Nakai I., Uesugi Y. Laser processing method: пат. 5690846 США; заявл. 21.12.1995; опубл. 25.11.1997
47. Jense W. F. Laser scanner: пат. 6974930 США; заявл. 21.09.2004; опубл. 12.12.2005
48. Aerotech Nmark SSaM Hardware Manual URL: http://www.aerotechmotioncontrol.com/ftp/pwpsoftware/manuals_helpfiles/Controllers/Automation%203200/Nmark%20SSaM.pdf (дата обращения: 30.10.2018)
49. Scanlab RTC6 control board URL: <https://www.scanlab.de/sites/default/files/PDF-Dateien/Data-Sheets/RTC6-EN.pdf> (дата обращения: 04.10.2019)
50. Kim K. et al. Laser scanner stage on-the-fly method for ultrafast and wide area fabrication // *Physics Procedia*. 2011. Т. 12. С. 452-458.
51. Bhaduri D. et al. An investigation of accuracy, repeatability and reproducibility of laser micromachining systems // *Measurement*. 2016. Т. 88. С. 248-261.
52. Sabo D. A., Brunner D., Engelmayer A. Advantages of digital servo amplifiers for control of a galvanometer based optical scanning system // *Optical Scanning 2005*. International Society for Optics and Photonics, 2005. Т. 5873. С. 113-120.

53. 55-S87-36T Diffraction Limited Performance F-Theta Scanning Lenses for Visible – NIR Wavelengths URL: <https://specialoptics.com/products/laser-optics/laser-scanning-lenses/vis-nir-laser-scanning-lenses> (дата обращения: 29.09.2020)
54. Weisz J. R. Software calibration of scan system distortions / Proc. SPIE, 1991. Т. 1454 С. 265–271
55. Pelsue K. Precision, post-objective, two-axis, galvanometer scanning / Proc. SPIE, 1983. Т. 390. С. 70-78
56. Tang Y. Accuracy analysis and improvement for direct laser sintering / Innovation in Manufacturing Systems and Technology (IMST), 2003. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/3898> (дата обращения: 07.10.2017)
57. Manakov A., Seidel H., Ihrke I. A Mathematical Model and Calibration Procedure for Galvanometric Laser Scanning Systems / Proc. of the Vision, Modeling, and Visualization Workshop, Berlin, Germany, 2011.
58. M. Pate Optical design and specification of telecentric optical systems / Proc. SPIE, 1998. Т. 3482. С 877 – 886
59. Weisz J. R. Calibrating laser trimming apparatus: пат. 4918284 США; заявл. 14.10.1988; опубли. 17.04.1990
60. Wang D., Yu Q., Ye X. Correction of the field distortion in embedded laser marking system //Optics & Laser Technology. 2014. Т. 57. С. 52-56.
61. Iwase K., Okano A. Galvanometer controller and laser machining apparatus: пат. 6674045 США; заявл. 6.03.2002; опубли. 6.01.2004
62. Chen X. et al. An algorithm for correction of distortion of laser marking systems //2007 IEEE International Conference on Control and Automation. – IEEE, 2007. – С. 487-491.
63. Chen M. F., Chen Y. P., Hsiao W. T. Correction of field distortion of laser marking systems using surface compensation function //Optics and Lasers in Engineering. 2009. Т. 47. №. 1. С. 84-89.
64. Xie J., Huang S., Duan Z. Positional correction algorithm of a laser galvanometric scanning system used in rapid prototyping manufacturing //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2005. Т. 26. №. 11-12. С. 1348-1352.

65. Cui S. et al. Calibration of a laser galvanometric scanning system by adapting a camera model //Applied optics. 2009. T. 48. №. 14. C. 2632-2637.
66. S. Leudtke et.al. Calibration of galvanometric laser scanners using statistical learning methods / Bildverarbeitung für die Medizin, 2015. C. 467-472
67. Wissel T. et al. Data-driven learning for calibrating galvanometric laser scanners //IEEE Sensors Journal. 2015. T. 15. №. 10. C. 5709-5717.
68. Kim C. H., Ahn D. C. Coaxial monitoring of keyhole during Yb: YAG laser welding //Optics & Laser Technology. 2012. T. 44. №. 6. C. 1874-1880.
69. Delgado M., Lasagni A. Reducing field distortion for galvanometer scanning system using a vision system //Optics and Lasers in Engineering. 2016. T. 86. C. 106-114.
70. Aerotech GalvoCFC - Galvo calibration file converter URL: <https://www.aerotech.com/product-catalog/software/galvocfc-galvo-calibration-file-converter/galvocfc-galvo-calibration-file-converter.aspx> (дата обращения: 30.10.2019)
71. SCANLAB Calibration Solutions URL: <https://www.scanlab.de/en/file/calibrationsolutions-en.pdf> (дата обращения: 10.10.2019)
72. Brosens P. J. Scanning speed and accuracy of moving magnet optical scanners //Optical Engineering. 1995. T. 34. №. 1. C. 200-208.
73. Tumer I., Wood K. L., Busch-Vishniac I. J. Modeling of dynamic effects caused by the beam delivery system in selective laser sintering //Proceedings of the 1995 Solid Freeform Fabrication Symposium. 1995. C. 353-361.
74. Chen M. F. et al. A scribing laser marking system using DSP controller //Optics and Lasers in Engineering. 2008. T. 46. №. 5. C. 410-418.
75. Yu Q. W. et al. Research on the trajectory control method for laser marking //Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2014. T. 579. C. 614-617.
76. Penchev P. et al. Generic software tool for counteracting the dynamics effects of optical beam delivery systems // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2017. T. 231. №. 1. C. 48-64.

77. Jaeggi B. et al. Ultra-high-precision surface structuring by synchronizing a galvo scanner with an ultra-short-pulsed laser system in MOPA arrangement //Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVII. – International Society for Optics and Photonics, 2012. Т. 8243. С. 82430К.
78. Pothen M., Winands K., Klocke F. Compensation of scanner based inertia for laser structuring processes //J. Laser Appl. 2017. Т. 29. №. 1.
79. Luo X., Li J., Lucas M. Galvanometer scanning technology for laser additive manufacturing //Laser 3D Manufacturing IV. – International Society for Optics and Photonics, 2017. Т. 10095. С. 1009512.
80. Buls S. et al. The influence of a dynamically optimized galvano based laser scanner on the total scan time of SLM parts //Solid Freeform Fabrication Symposium. – 2013. – С. 260-266. URL: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2013/2013-21-Buls.pdf> (дата обращения: 10.10.2019)
81. Pieczona S., Zollitsch S., Zaeh M. Dynamics enhancement of galvanometer laser scanners by adaptive inverse control //2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2017. С. 253-258.
82. Yoo H., Ito S., Schitter G. High speed laser scanning microscopy by iterative learning control of a galvanometer scanner //Control Engineering Practice. 2016. Т. 50. С. 12-21.
83. Ellis G. Control system design guide: using your computer to understand and diagnose feedback controllers. Butterworth-Heinemann, 2012. 520 с.
84. Aerotech ABL1000 Series Stage User's Manual URL: http://www.aerotechmotioncontrol.com/ftp/pwpsoftware/manuals_helpfiles/Mechanical/Stages%20Tables%20and%20Slides/ABL1000.pdf pdf (дата обращения: 17.10.2018)
85. Newport XM-S Series Ultra-Precision Linear Motor Stages User Manual https://www.newport.com/mam/celum/celum_assets/resources/XM-S_-_User_s_Manual.pdf?1 pdf (дата обращения: 17.10.2018)
86. Pi Micos LMS-180 Linear Motor Stage User Manual URL: https://static.physikinstrumente.com/fileadmin/user_upload/physik_instrumente/fil

- es/user_manuals/MAN_LMS-180_9_EN_01.PDF?_ga=2.160582205.1821487032.1540265628-732433678.1540265628 pdf (дата обращения: 17.10.2018)
87. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. М.: Энергоатомиздат, 1987. 200 с.
88. Yedamale P. Brushless DC (BLDC) motor fundamentals //Microchip Technology Inc. 2003. Т. 20. С. 3-15. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00885a.pdf> (дата обращения: 8.11.2018)
89. Renishaw Tonic Encoder System URL: <https://www.renishaw.com/media/pdf/en/63ad9020c19a41dcbc9da16f5fb176dc.pdf> (дата обращения: 19.10.2018)
90. Renishaw RSLM20 high accuracy stainless steel scale URL: <https://www.renishaw.com/media/pdf/en/bcc8759098cd40bca14b1ff6577596eb.pdf> (дата обращения: 19.10.2018)
91. Heidenhain Exposed Linear Encoders, 2018. URL: https://www.heidenhain.de/fileadmin/pdb/media/img/208960-2E_Exposed_Linear_Encoders_en.pdf (дата обращения: 19.10.2018)
92. Renishaw High precision laser interferometer feedback systems URL: <http://resources.renishaw.com/en/details/brochure-high-precision-laser-interferometer-feedback-systems--37786> (дата обращения: 19.10.2018)
93. Yun S. Y. et al. Position control of low cost brushless DC Motor using Hall sensor //2012 Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications. IEEE, 2012. С. 1-4.
94. B. Akin, M. Bhardwaj Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors / Texas Instruments, 2010. URL: https://e2e.ti.com/cfs-file/__key/communityserver-discussions-components-files/171/_5B00_sprabq6_5D00_-Trapezoidal-Control-of-BLDC-Motors-Using-Hall-Effect-Sensors.pdf (дата обращения: 18.12.2019)
95. Low T. S. et al. Servo performance of a BLDC drive with instantaneous torque control //IEEE Transactions on Industry Applications. 1992. Т. 28. №. 2. С. 455-462.

96. John J., Kumar S., Jaya B. Space vector modulation based field oriented control scheme for brushless DC motors //2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology. IEEE, 2011. С. 346-351.
97. Xu H., Jani Y. Understanding Sensorless Vector Control for Brushless DC Motors //IEEE Embedded Systems Conference Silicon Valley. 2008. С. 3-22.
98. Schwenke H. et al. Geometric error measurement and compensation of machines—an update //CIRP annals. 2008. Т. 57. №. 2. С. 660-675.
99. Lee J., Liu Y., Yang S. Accuracy improvement of miniaturized machine tool: Geometric error modeling and compensation // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006. Т. 46. С. 1508–1516.
100. Park C. H. et al. Development of an ultra precision machine tool for micromachining on large surfaces //International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2009. Т. 10. №. 4. С. 85-91.
101. Tian W. et al. Error modeling and sensitivity analysis of a five-axis machine tool //Mathematical Problems in Engineering. 2014. Т. 2014.
102. Huang N. et al. Integrated post-processor for 5-axis machine tools with geometric errors compensation //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2015. – Т. 94. – С. 65-73.
103. Aerotech High-speed, sub-micron positioning // Industrial Technology URL: <https://www.industrialtechnology.co.uk/products--high-speed-sub-micron-positioning.html> (дата обращения: 19.10.2018)
104. Renishaw XL-80 laser system URL: <https://www.renishaw.com/media/pdf/en/5d15dd21874642ba986dbdefb6ede174.pdf> (дата обращения: 19.10.2018)
105. QuickView™ and QuickviewXL™ software. Real time dynamic analysis URL: <https://www.renishaw.com/media/pdf/en/f0905988fcf14f12b9a420f41966de84.pdf> (дата обращения: 19.10.2019)
106. Linear motors application guide. Aerotech, 2010. URL: <https://www.aerotech.com/media/136335/linear-motors-application-en.pdf> (дата обращения: 21.02.2020)

107. Kir'yanov V. P. et al. Analysis of modern technologies for synthesizing goniometric structures for high-accuracy angle measurements (Analytical review) //Journal of Optical Technology. 2007. Т. 74. №. 12. С. 823-830.
108. Edmund Optics TECHSPEC PlatinumTL series telecentric lens URL: <https://www.edmundoptics.com/document/download/380227> (дата обращения: 27.10.2018)
109. IDS Imaging UI-5490SE-M-GL camera URL: https://en.ids-imaging.com/IDS/datasheet_pdf.php?sku=AB.0010.1.52802.23 (дата обращения: 29.10.2018)
110. Edmund Optics TECHSPEC Silver series telecentric lens URL: <https://www.edmundoptics.com/document/download/380175> (дата обращения: 29.10.2019)
111. Stil SA Production catalog URL: <http://ecatalog.stil-sensors.com/STIL-catalog.pdf> (дата обращения: 29.10.2019)
112. De la Escalera, A.; Armingol, J.M. Automatic Chessboard Detection for Intrinsic and Extrinsic Camera Parameter Calibration // Sensors, 2010. № 10. С. 2027-2044.
113. Yimin L. et al. A novel approach to sub-pixel corner detection of the grid in camera calibration //2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010). IEEE, 2010. Т. 5. С. V5-18-V5-21.
114. Green J. Locating tie-points on a grid / Old Dominion Univ., NASA-ODU American Society for Engineering Education (ASEE) Summer Faculty Fellowship Program, 1993. С. 104-108 URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19940023403> (дата обращения: 21.01.2019).
115. Бессмельцев В.П., Булушев Е.Д. Быстрый алгоритм совмещения изображений для контроля качества лазерной микрообработки // Компьютерная оптика, 2014. Т. 38. № 2. С. 343–350.
116. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms //IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 1979. Т. 9. №. 1. С. 62-66.

117. TMS320C28x Extended instruction sets, technical reference manual. Texas Instruments, 2019. URL: <http://www.ti.com/lit/ug/spruhs1c/spruhs1c.pdf> (дата обращения: 06.03.2020).
118. Floating-Point Megafunctions, User Guide. Altera, 2013. URL: https://www.intel.co.jp/content/dam/altera-www/global/ja_JP/pdfs/literature/ug/ug_altfp_mfug.pdf (дата обращения: 06.03.2020)
119. Баев С. и др. Особенности технологии прецизионной фемтосекундной микрообработки оптических материалов / Интерэкспо Гео-Сибирь, 2016. Новосибирск URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-tehnologii-pretsizionnoy-femtosekundnoy-mikroobrabotki-opticheskikh-materialov> (дата обращения: 05.01.2019).
120. Blais F. Control of low inertia galvanometers for high precision laser scanning systems // Optical Engineering, 1988. Т. 27. № 2. С. 104-110
121. Bukys A. Considerations in the Design of Servo Amplifiers for High Performance Scanning System / Proc. SPIE, 1991. Т. 1454. URL: <http://spie.org/Publications/Proceedings/Volume/1454?SSO=1> (дата обращения: 28.10.2019)
122. Выскуб В. Г. и др. Устройства и системы автоматического управления высокой точности. Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2009. 308 с.
123. Duma V.-F. Experimental investigations of the scanning functions of galvanometer-based scanners with applications in OCT // Applied optics, 2011. Т. 50. №. 29. С. 5735- 5749.
124. Mnerie C., Preitl S., Duma V. F. Mathematical model of a galvanometer-based scanner simulations and experiments Proc. SPIE, 2013. Т. 8789. URL: https://www.researchgate.net/publication/260957635_Mathematical_model_of_a_galvanometer-based_scanner_Simulations_and_experiments (дата обращения: 28.10.2019)
125. Servo Driver Solutions for Optical Scanning URL: https://www.cambridgetechnology.com/sites/default/files/Datasheet%20-%20AnalogServo-DCR1_DS00009_v9.pdf (дата обращения: 27.10.2019)

126. 62xxH Galvanometer Scanners Series URL:
https://www.cambridgetechnology.com/sites/default/files/Datasheet%20-%20Galvos-62xxH%20Series-DS00003_R1_v4.pdf (дата обращения: 27.10.2019)
127. Malinowski A., Yu H. Comparison of embedded system design for industrial applications //IEEE transactions on industrial informatics. 2011. Т. 7. №. 2. С. 244-254.
128. Monmasson E., Cirstea M. FPGA design methodology for industrial control systems—A review //IEEE transactions on industrial electronics. 2007. Т. 54. №. 4. С. 1824-1842.
129. Astarloa A. et al. FPGA technology for multi-axis control systems //Mechatronics. 2009. Т. 19. №. 2. С. 258-268.
130. Буч Г., Рамбо Д., Джекобсон А. Язык UML руководство пользователя. С-Пб.: ДМК Пресс, 2004. 432 с.
131. Zwolinski M. Digital System Design With SystemVerilog. Pearson Education, 2010. 408 с.
132. Habibi A., Tahar S. A survey on system-on-a-chip design languages //The 3rd IEEE International Workshop on System-on-Chip for Real-Time Applications, 2003. Proceedings. IEEE, 2003. С. 212-215.
133. Intel ARM-Based SoC FPGAs URL: <https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/br/br-soc-fpga.pdf> (дата обращения: 8.11.2019)
134. Machidon O. et al. Remote SoC/FPGA platform configuration for cloud applications //2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM). IEEE, 2014. С. 827-832.
135. LwIP - A Lightweight TCP/IP stack. URL:
<http://savannah.nongnu.org/projects/lwip/> (дата обращения: 8.11.2019)
136. ScanMaster Controller. URL: https://www.cambridgetechnology.com/sites/default/files/ScanMaster%20Controller_0.pdf (дата обращения: 10.12.2019)
137. Sino-galvo CSG9210 Marking Control Board URL: <http://sino-galvo.com/ypros-show-122-507.aspx> (дата обращения: 11.12.2019)

138. Полушкин С. Эффективное управление комплексом лазерной гравировки. // Фотоника, 2010. № 6. С. 10-12.
139. Усовершенствования в изготовлении бумаги: пат. 2199618 Рос. Федерация: МПК8 D21F 1/44, D21H 21/42/ Ишервуд Р., Ридйард С.; заявитель и патентообладатель ДЕ ЛЯ РЮ ИНТЕРНЭШНЛ ЛИМИТЕД (GB). – № 2001121158/12; заявл. 16.12.1999; опубл. 27.02.2003, Бюл. № 6. – 4 с.
140. ГОСТ Р 52535.1-2006 Карты идентификационные. Машиносчитываемые дорожные документы. Часть 1. Машиносчитываемые паспорта. М.: Стандартинформ, 2006. 15 С.
141. Goloshevsky N. et al. Precision laser system based on complementary scanning principle for dielectric materials microprocessing //Fundamentals of Laser Assisted Micro-and Nanotechnologies. International Society for Optics and Photonics, 2008. Т. 6985. С. 69850М.
142. Abbasi M. H., Moradian H., Moradi H. Design of sliding mode and model reference adaptive control strategies for multivariable tape transport mechanism: a performance comparison //Microsystem Technologies. 2016. Т. 22. №. 2. С. 419-431.
143. Архангельский С.В., Таюрский В.Е. Нумерация детонаторов на шахтах Кузбасса. //Безопасность труда в промышленности. 1974. №4. С. 41.
144. Типовая инструкция по маркированию обжимными устройствами электродетонаторов и капсулей- детонаторов в металлических гильзах. // М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013
145. Шумский А., Лютиков Г., Хаслер В., Чернин В. Маркировка электродетонаторов и капсулей-детонаторов. // Безопасность труда в промышленности, 1987. №3. С. 41-44.
146. Колганов Е., Ильин В., Соснин В., Страхов А. Маркировка средств инициирования. // Взрывное дело, 2010. № 104/61. С. 235-243.
147. Barcode Handbook. Barcode Type Selection Guide. Keyence of America, 2018. URL: <https://www.keyence.com/download/download/confirmation/?dlAssetId=>

AS_99283&dlSeriesId=&dlModelId=&dlLangId=&dlLangType=en-US (дата обращения: 21.12.2019)

148. ГОСТ Р ИСО/МЭК 16022-2008 Автоматическая идентификация. Кодирование штриховое. Спецификация символики DATA MATRIX. М. Стандартинформ, 2009. 130 С.
149. ОСТ 3-6813-93 Шрифты, знаки, линии стеклянных сеток и шкал оптических приборов. типы, основные параметры и размеры.
150. Zhao X., Shin Y. C. Femtosecond laser drilling of high-aspect ratio microchannels in glass //Applied Physics A. – 2011. – Т. 104. – №. 2. – С. 713-719.
151. Bessmeltsev V., Bulushev E. Optimization of laser micromachining regimes // Optoelectron. Instrum. Data Process, 2014. Т. 50. № 6. С. 533–548.
152. Baev S. et al. Method of crack-free laser writing of microchannels on glass substrates //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019. Т. 537. №. 2. С. 022059.
153. J Series Ultra-fast laser micromachining System. OXFORD LASERS INC., 2018. URL: <https://www.oxfordlasers.com/wp-content/uploads/2013/01/J-Series-A4.pdf> (дата обращения: 2.06.2019)
154. Femtosecond laser micromachining system datasheet. Workshop of Photonics, 2018. URL: <https://wophotonics.com/wp-content/uploads/2015/09/FemtoFAB-datasheet.pdf> (дата обращения: 3.06.2019)