

На правах рукописи

Обухов Александр Игоревич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГИБКОСТИ СИСТЕМ ЧПУ  
ЛАЗЕРНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИХ  
МОДУЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ АРХИТЕКТУРЫ

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами (технические системы)»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2011 г.

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО Московском государственном технологическом университете «СТАНКИН».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Мartiнов Георги Мартинов

Официальные  
оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Аршанский Михаил Маркович

кандидат технических наук  
Дильман Аркадий Михайлович

Ведущее предприятие: ОАО Национальный институт авиационных  
технологий (НИАТ)

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г. в \_\_ часов на  
заседании диссертационного совета Д 212.142.03 при ФГБОУ ВПО  
Московском государственном технологическом университете «СТАНКИН»  
по адресу: 127055, Москва, Вадковский переулок, д. 3а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО  
Московского государственного технологического университета  
«СТАНКИН».

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доц.



Семячкова Е.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** При помощи лазерного оборудования в настоящее время решаются технологические задачи маркировки, послойного порошкового синтеза, графики в прозрачных средах, сварки, закалки, резки листового металла и комбинированной механо-лазерной обработки. В последние годы начинает использоваться совмещение систем дефлексии лазерного луча с приводами подачи для обеспечения обработки заготовок с большими габаритами. В таких случаях необходимо совместное управление несколькими устройствами для позиционирования лазерного луча, что требует особого подхода к построению архитектуры системы управления.

Анализ систем ЧПУ ведущих мировых (Fanuc, Siemens, Heidenhein, Bosch Rexroth, Fagor, Mitsubishi Electric) и отечественных (Балт-Систем, Модмаш-софт, Микрос, ФГБОУ ВПО МГТУ “СТАНКИН”) разработчиков выявил следующие проблемы:

- ограниченность механизма расширения геометрической задачи управления. Специалист без глубокого знания методики реализации интерполятора системы ЧПУ и наличия исходного кода не может добавить собственные алгоритмы интерполяции для выполнения специфических задач;
- отсутствие механизма совместного управления разнородными устройствами (дефлектором и приводами подач), осуществляющими перемещение пятна лазерного луча в рабочем поле в рамках выполнения одной управляющей программы;
- отсутствие единой методики реализации параметрического программирования для лазерной обработки;
- у станкостроителей и конечных пользователей отсутствует возможность реализовывать синхронизацию движения с импульсами лазера.

Указанные проблемы не позволяют использовать одну модель системы ЧПУ для решения класса технологических задач по управлению лазерной обработкой, поэтому на рынке существует множество специализированных систем управления. Разработка обобщенного решения, обеспечивающего возможность компоновки систем управления для разных установок на основе единой архитектуры, позволит значительно снизить затраты на разработку и обслуживание установок для лазерной обработки, а также на обучение персонала. Кроме того, реализация в системе ЧПУ возможности синхронизации движения с лазерным излучением значительно повысит эффективность импульсной обработки.

Исходя из сказанного, можно заключить, что тема диссертации, направленная на разработку метода обеспечения гибкости систем ЧПУ лазерного технологического оборудования на основе их модульной организации архитектуры, является актуальной.

**Цель работы.** Повышение эффективности процесса разработки систем ЧПУ лазерного технологического оборудования на основе модульной организации архитектуры, обеспечивающей гибкость системы управления.

**Задачи исследования.** Для достижения цели в работе были поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ программного обеспечения систем ЧПУ с целью выявления проблем, возникающих при адаптации этих систем для управления классом технологического оборудования на базе лазеров с непрерывным и импульсным излучением.
2. Построить архитектурную модель системы ЧПУ с расширяемой модульной архитектурой для управления лазерным оборудованием.
3. Разработать механизм параметрического программирования контуров для систем лазерной обработки.
4. Разработать модуль интерполятора с расширяемой архитектурой и алгоритмы управления движением для лазерной обработки сложных контуров, интегрировать их в ядре однокомпьютерной системы ЧПУ.
5. Проверить достоверность полученных результатов на основе сравнения теоретических данных с данными, полученными при проведении экспериментальных исследований.

**Методы исследования.** Теоретические исследования в работе базировались на методах системного анализа, объектно-ориентированного проектирования (декомпозиции, абстракции), концепции объектно-ориентированного программирования. Использовались технологии .Net, DCOM (distributed component object model), автоматизация OLE (object linking and embedding).

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие научные результаты:

- установлены взаимосвязи между аппаратными и программными компонентами систем ЧПУ для лазерных станков, позволившие выделить совокупность общих модулей и создать на их основе единое архитектурное решение для задач лазерной обработки;
- на основании установленных взаимосвязей разработана архитектурная модель обобщенной системы ЧПУ для управления установками лазерной маркировки, графики в прозрачных средах, послойного синтеза и комбинированной механо-лазерной обработки, основанная на архитектуре системы управления класса PCNC;
- разработаны алгоритмы опережающего просмотра траектории и управления движением по параметрическим кривым для импульсных лазерных систем, позволяющие исключить остановки в обрабатываемых точках и обеспечить постоянную контурную скорость.

**Практическая значимость работы** заключается в:

- методике компоновки системы управления для задач лазерной маркировки, графики в прозрачных средах, послойного синтеза и

комбинированной механо-лазерной обработки на основе предложенного единого архитектурного решения, позволяющей сократить время и себестоимость процесса разработки систем управления для лазерных станков;

- разработанных программных модулях управления движением, использующих сплайновую интерполяцию и алгоритм опережающего просмотра кадров, что повышает эффективность импульсной низкочастотной лазерной обработки.

**Апробация работы.** Теоретические и практические результаты, полученные автором, докладывались на заседаниях кафедры «Компьютерные системы управления» ФГБОУ ВПО МГТУ «Станкин», семинарах научно-образовательного центра в области компьютерного моделирования и управления технологическими системами, созданного в ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН» совместно с Институтом проблем управления РАН, а также на международной конференции «AEROSPACE - 2008», VII научно-технической конференции «Мехатроника. Автоматизация. управление» (МАУ-2010), 18-й международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии» и 2-й Международной Интернет-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов INNOTECH 2010.

Разработанная в рамках диссертации система управления лазерными станками используется в учебном процессе по дисциплинам «Структура и математическое обеспечение систем управления» и «Программное обеспечение систем управления» на кафедре «Компьютерные системы управления» ФГБОУ ВПО МГТУ «Станкин».

Практические разработки по данным темам отмечены дипломом 10-й юбилейной выставки «Передовые технологии автоматизации-2010» (ПТА-2010) «Автоматизация и встраиваемые системы», золотой медалью XIV московского международного салона изобретений и инновационных технологий "АРХИМЕД-2011", серебряной медалью и дипломом 110-го юбилейного международного салона изобретений «Конкурс Лепин» (Париж), золотой медалью международной выставки изобретений и инноваций INPEX 2011 (Питтсбург, США).

**Реализация результатов работы.** Результаты работы использованы для создания систем управления и установок по темам: «Создание многофункционального интеллектуального контроллера движения с открытой архитектурой для управления технологическим оборудованием» (г/б НИР 10-52/р, госконтракт № П926 от 20.08.2009 г.), «Создание многофункциональной компьютерной системы управления для промышленных лазерных приборов послойного порошкового синтеза» (г/б НИР 10-41/р, госконтракт № П500 от 13.05.2010 г.), «Создание многофункциональной системы ЧПУ для управления станками лазерной гравировки в объеме и на плоскости» (г/б НИР 10-69/р, госконтракт № 14.740.11.0541 от 01.10.2010 г.).

На основе результатов работы созданы объекты интеллектуальной собственности (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ: №2010613433 от 25.05.2010, №2010617383 от 14.09.2010, №2011610552 от 11.01.2011, №2011610554 от 11.01.2011, №2011611201 от 04.02.2011, №2011614339 от 01.06.2011).

**Публикации.** По теме диссертации было опубликовано 8 научных статей (из них 3 в журналах, рекомендованных ВАК), включая тезисы докладов, опубликованных в рамках международных и региональных научно-технических конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 63 наименований. Основная часть работы изложена на 116 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка, 13 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы по разработке метода обеспечения гибкости систем ЧПУ для задач лазерной обработки, сформулированы цели и задачи исследования, раскрыто основное содержание научной новизны и практической ценности выполняемой работы.

**В первой главе** на основе научных трудов Соломенцева Ю.М., Сосонкина В.Л., Мартинова Г.М., Горнева В.Ф., Аршанского М. М. и других специалистов в области разработки программного обеспечения систем управления и информационных систем в промышленности производится анализ программного обеспечения современных систем ЧПУ и возможностей их адаптации для лазерного технологического оборудования. Сформулированы основные положения по постановке задач исследования.

Важной особенностью всех современных систем ЧПУ является открытость архитектуры, позволяющая пользователю в той или иной степени преобразовывать структуру системы под свои специфические нужды. В архитектуре систем ЧПУ выделяют несколько прикладных разделов, называемых задачами управления. Важнейшей задачей, адаптация которой в первую очередь необходима для обеспечения управления лазерными системами, является геометрическая, отвечающая за управление движением и формообразованием. Геометрическая задача состоит из трех основных модулей: интерпретатора управляющих программ, интерполятора, модуля управления приводами. Интерполятор имеет, как правило, модульную архитектуру. Однако, в современных системах ЧПУ набор модулей для различных типов интерполяции либо заранее жестко задан, либо его может расширять только производитель (в редких случаях станкостроитель). Поэтому существует проблема построения такой структуры ядра интерполятора, которая позволит пользователю добавлять свои методы

управления движением и адаптировать их для лазерной обработки без модификации архитектуры системы.

В настоящее время в производстве используется широкий класс оборудования на базе лазеров, работающих в импульсном режиме с частотой следования импульсов порядка 10 - 100 Гц. Существует несколько областей применения таких установок: импульсная лазерная наплавка; импульсная лазерная сварка; маркировка (нанесение информации на детали изделия); графика в прозрачных средах (предназначена для получения надписей, рисунков, схематических и художественных изображений в объеме детали).

Главная особенность управления импульсными установками заключается в необходимости обеспечения строгой синхронизации между импульсами лазера и перемещением заготовки. При этом частота импульсов должна выдерживаться с определенной допустимой погрешностью, иначе энергия и расходимость пучка будут недостаточны для обработки точки. Вследствие этого, системы управления импульсными лазерными станками в настоящее время реализуют схему управления с автоматическим заданием частоты импульсов накачки, показанную на рис. 1. Здесь отображен вариант станка для лазерной графики в прозрачных средах. Заготовка устанавливается на столе, осуществляющем перемещение по осям X и Y. Лазер неподвижен и имеет привод фокусировки по оси Z. В других компоновках заготовка фиксируется, а лазер или система зеркал перемещаются в горизонтальной плоскости.

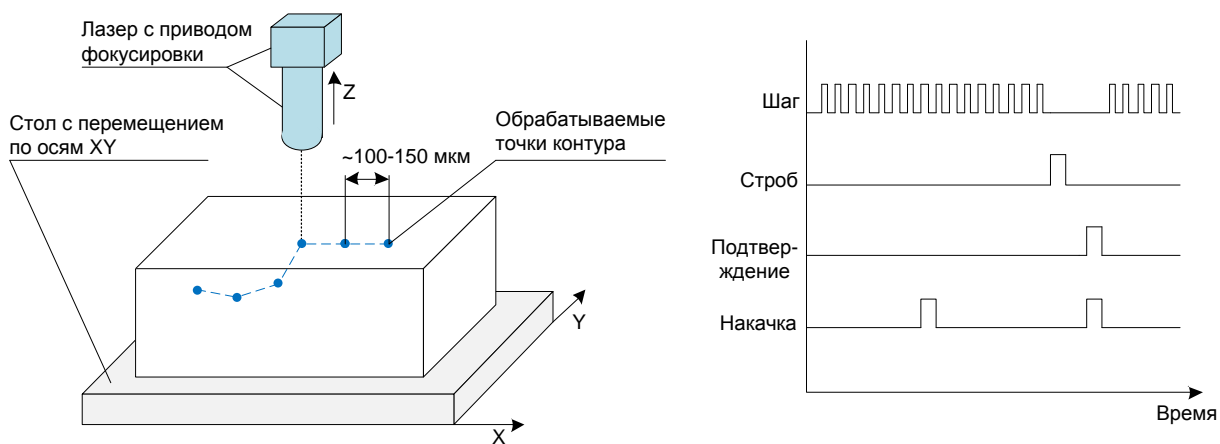


Рис. 1. Схема взаимодействия системы управления с импульсным лазерным станком

Этапы взаимодействия систем станка при обработке отдельной точки:

1. Система управления выдает сигналы перемещения («Шаг») на приводы подач вплоть до достижения очередной точки, заданной в управляющей программе.
2. Движение прекращается, после чего посылается сигнал («Строб») на модуль лазера для перевода резонатора в активное состояние.
3. В момент очередного импульса накачки происходит прожиг точки. Импульсы накачки автоматически генерируются независимо от других сигналов.

4. Система управления ожидает сигнал лазера («Подтверждение») об успешной обработке точки.
5. Начинается новый цикл (перемещение в очередную точку рисунка).

Отсутствие в системах управления лазерными станками синхронизации движения с импульсами накачки требует осуществления останова в каждой обрабатываемой точке. Помимо увеличения динамических нагрузок на механическую часть установки, это ведет к необходимости реализовывать движение с простейшим профилем разгона и торможения (нулевая скорость в начале и конце кадра), как это показано на рис. 2.

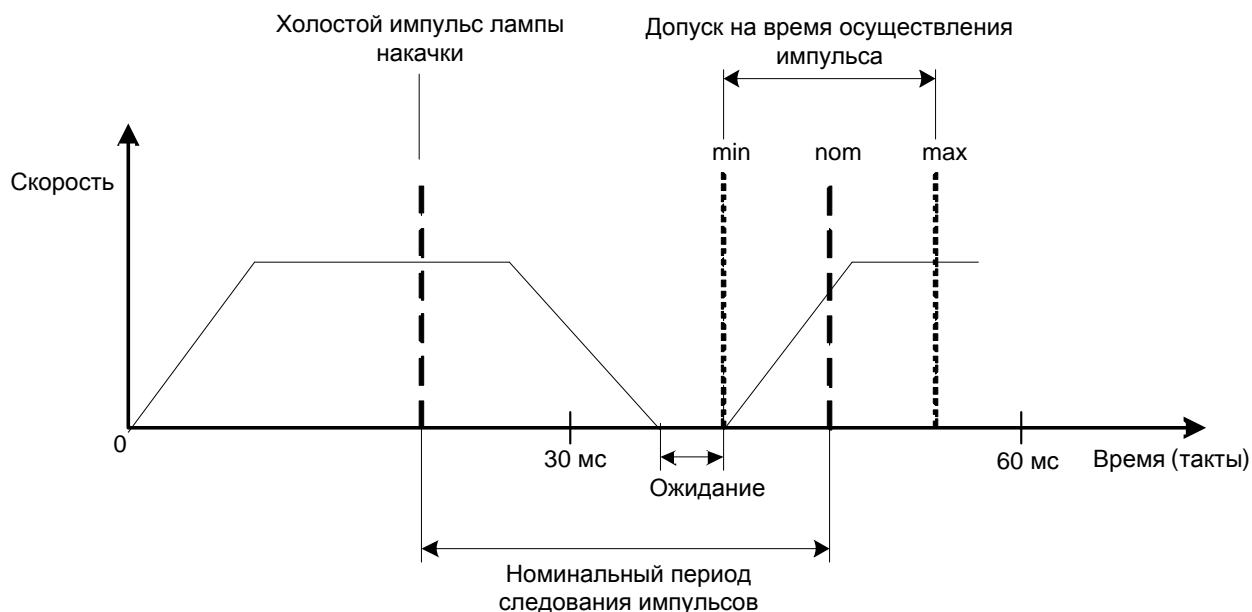


Рис. 2. График скорости при управлении импульсной обработкой

Здесь *min*, *nom*, *max* – моменты времени, определяемые допуском на частоту импульсов. Из данной схемы следует, что значительную часть времени обработка производится со скоростью значительно ниже номинальной, что ведет к серьезной потере производительности. Попытка пройти путь между точками без разгона и торможения приведет к сильной вибрации или срыву движения из-за резкой динамической нагрузки на приводы.

Анализ алгоритмов управления движением в системах ЧПУ показал, что для лазерной обработки основной интерес представляет реализация и внедрение алгоритма опережающего просмотра кадров (*look ahead*), так как он позволит значительно поднять производительность системы при использовании любых типов интерполяции без ухудшения качества изделия. Это обуславливается поддержанием максимально допустимой контурной скорости перемещения луча, что особенно актуально для типов лазерной обработки, где необходимо обеспечивать постоянные температурные условия вдоль обрабатываемого контура. В свою очередь, применение сплайновой интерполяции значительно снижает динамические нагрузки на станок путем минимизации резких изменений вектора движения пятна луча (ввиду обеспечения непрерывности двух первых производных), что



позволяет повысить эффективность применения алгоритма опережающего просмотра. Таким образом, перед нами встает задача разработки алгоритма, позволяющего при импульсной обработке проходить точки с заданной скоростью, что даст возможность использовать все преимущества комбинации методов опережающего просмотра кадров и сплайновой интерполяции.

Исследование специфики управления лазерным лучом в разных установках показывает, что для позиционирования луча в плоскости и его фокусировки могут применяться два способа управления:

- с помощью линейных, шаговых и других типов приводов, получающих параметры движения непосредственно от интерполятора системы ЧПУ;
- с помощью устройств, реализующих внешнее управление движением. Такие устройства получают списки команд движения через автономные контроллеры и самостоятельно обрабатывают перемещение луча в рабочем поле.

Одними из самых распространенных устройств, реализующих внешнее управление движением луча, являются гальваносканаторы (системы дефлексии лазерного луча). В некоторых системах сканаторы могут применяться вместе с традиционными линейными и другими приводами. Таким образом, универсальная архитектура системы ЧПУ для лазерной обработки должна предусматривать возможность одновременного управления обычными приводами и сканатором.

Анализ систем мировых и отечественных производителей позволил выявить проблемы, возникающие при адаптации систем ЧПУ для задач лазерной обработки (см. Таблицу 1).

Параметрическое программирование реализовано во всех рассмотренных системах по-разному из-за отсутствия стандарта. Выделяются два самых распространенных варианта – использование структурированного языка, подобного C или Pascal, либо графические инструменты создания пользовательских циклов (более ограниченное решение). Средства адаптации пользовательского интерфейса имеются везде, хотя и ограничены лишь функцией программирования циклов в некоторых системах. В случае систем Siemens эти средства (advanced HMI) предоставляются за дополнительную плату.

Таким образом, в многофункциональных системах ЧПУ в настоящий момент существуют две нерешенные проблемы – управление движением через внешние устройства и адаптация интерполятора для задач импульсной низкочастотной обработки.

На основе проведенного анализа программного обеспечения систем ЧПУ и выявленных проблем поставлена цель и сформулированы задачи исследования. Для практического применения результатов работы выбрана отечественная система ЧПУ АxiOMA Ctrl (МГТУ «СТАНКИН»), имеющая модульную открытую архитектуру и доступный для автора диссертации исходный код.

Таблица 1. Сравнительная таблица возможностей адаптации для лазерных станков систем ЧПУ основных мировых и отечественных производителей

Сист. ЧПУ Критерий	30/31/32i (FANUC)	SINUMERIK 840D sl (Siemens)	iTNC 530 (Heidenhain)	MTX advanced (Rexroth)	Andronic 2060/3060 (Andron)	NC-210/310 (Балт-Систем)	АxiOMA Ctrl (МГТУ Станкин)
Внешнее управление движением	нет	нет	нет	нет	нет	нет	добавлено
Параметрическое программирование	Комбинация ISO-7bit и стандарта ANSIC	Высокоуровневая настройка над стандартом ISO-7bit	Параметризованные циклы	Язык высокого уровня CPL	Язык высокого уровня anlog-C (подмножество ANSIC)	Параметризованные циклы	добавлено
Адаптация пользовательского интерфейса для задач лазерной обработки	Макроязыки для создания режимов	Создание расширений интерфейса оператора	Графическая поддержка написания циклов	Интеграция пользовательских экранов	Создание пользовательских панелей	Создание виртуального станочного пульта	Создание дополнительных режимов
Адаптация интерполятора к задачам импульсной обработки	нет	нет	нет	нет	нет	нет	добавлено
Наличие слотов расширения PCI	нет	1 x PCI	нет	1 x PCI	2 x PCI	нет	1-4 PCI

**Во второй главе** установлены взаимосвязи между программными и аппаратными модулями систем управления лазерным оборудованием, что дало возможность выделить общие компоненты и создать единое архитектурное решение для задач лазерной маркировки, графики в прозрачных средах, послойного синтеза и комбинированной механо-лазерной обработки. Предложена модель интерполятора системы ЧПУ, позволяющая модифицировать расчет параметров движения для реализации адаптивного управления, например, управления импульсной низкочастотной обработкой.

Анализ специализированных установок и систем управления для лазерной обработки, а также проведенное в главе 1 исследование открытости многофункциональных систем ЧПУ позволили выделить совокупность общих для всех систем модулей (рис. 3).

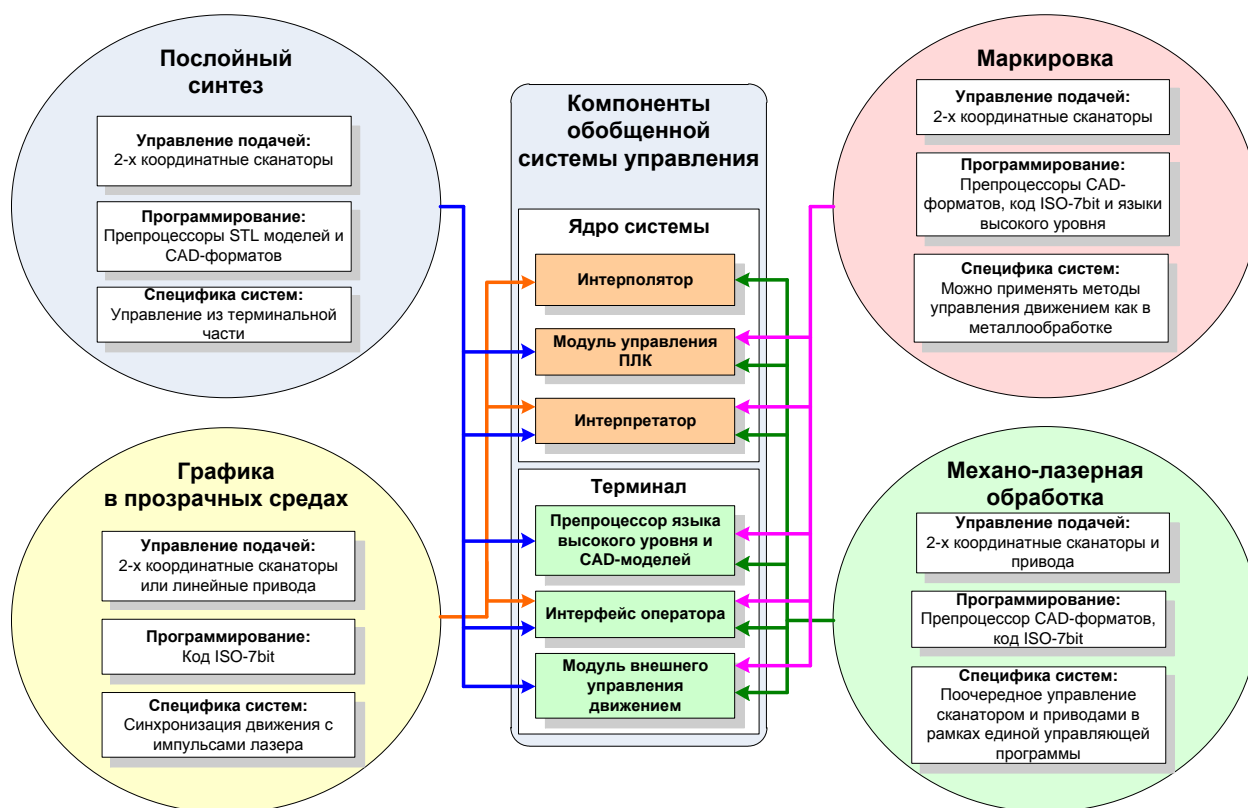


Рис. 3. Выделение компонентов обобщенной системы ЧПУ для управления лазерной обработкой

На основе совокупности общих модулей построена обобщенная структурная модель системы ЧПУ для лазерной обработки. Управление гальваносканаторами и другим оборудованием с автономной функцией позиционирования луча предлагается реализовывать через модуль внешнего управления, имеющий такие же интерфейсы как интерполятор, но делегирующий непосредственное управление движением внешним устройствам (например, контроллеру сканатора). Общая структура системы ЧПУ с реализацией функции внешнего управления показана на рис. 4.

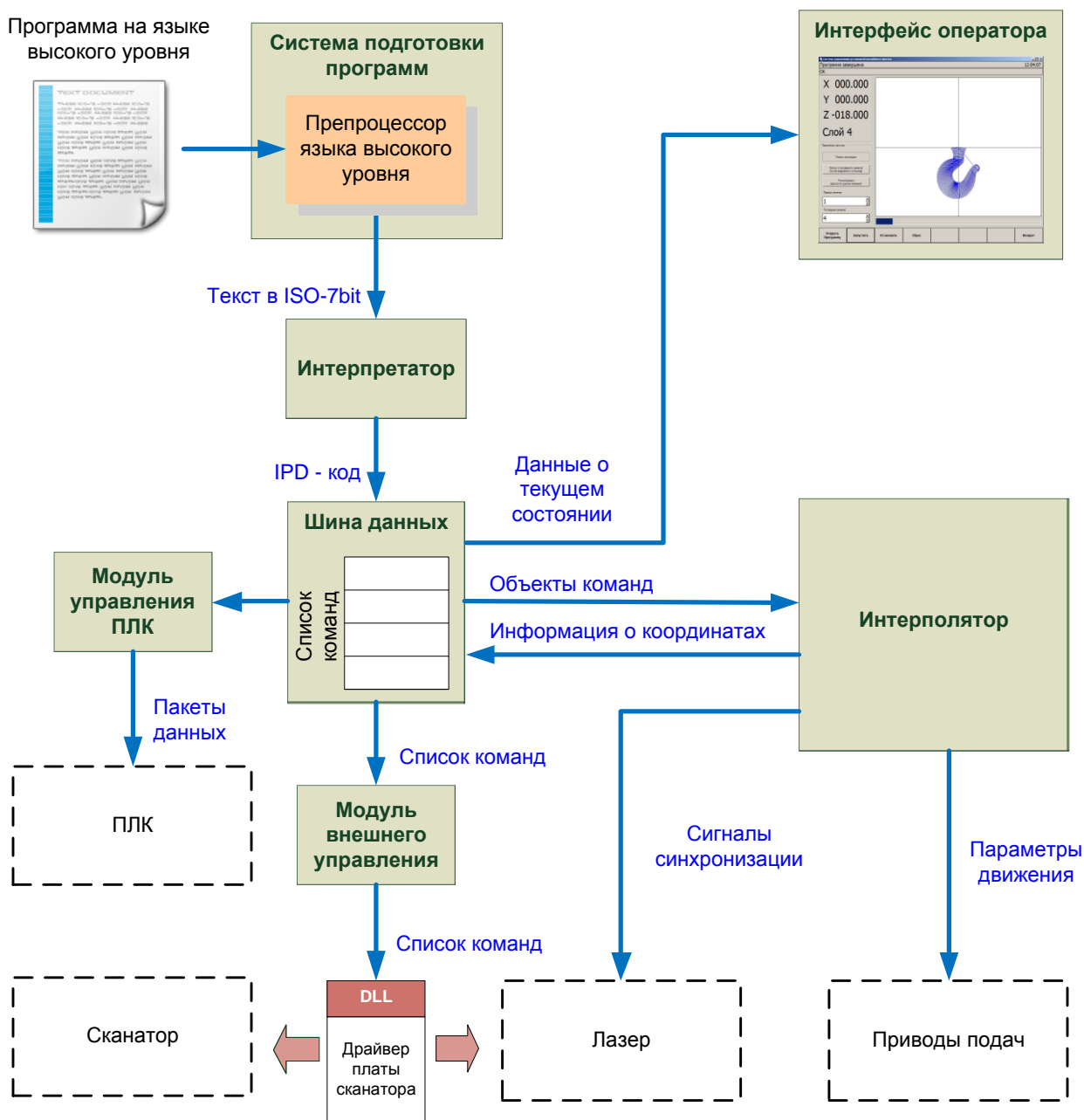


Рис. 4. Структура системы ЧПУ для управления лазерной обработкой

Система подготовки программ преобразует исходную модель изделия или программу в набор кадров ISO-7bit, составляющих траекторию обработки. Система подготовки программ содержит препроцессор языка высокого уровня (или несколько таких препроцессоров, соответствующих разным поддерживаемым языкам) для реализации параметрического программирования (см. главу 3).

Интерпретатор реализует чтение кадров управляющей программы и их преобразование в формат команд интерполятора.

Интерфейс оператора отображает информацию об обрабатываемом объекте, ходе обработки, диагностической информации. Предоставляет оператору возможности по управлению системой.

Шина данных организует взаимодействие всех задач управления. Данный модуль целесообразно реализовывать в виде объектно-ориентированного канала.

Модуль управления ПЛК осуществляет взаимодействие с контроллерами электроавтоматики и обеспечивает абстракцию программного решения от специфики конкретного производителя.

В предложенной схеме список команд, созданных интерпретатором при интерпретации управляющей программы, доступен как интерполятору, так и модулю внешнего управления. При этом остается возможность как прямого управления приводами, так и управления сканатором в рамках одной управляющей программы.

Реализация описанной схемы позволяет использовать одну систему ЧПУ для класса технологических задач лазерной обработки (маркировка, послойный синтез и др.) без принципиальных изменений в архитектуре системы.

Открытость предлагаемой архитектуры системы ЧПУ предоставляет возможность обработки любых типов участков траекторий, описанных в параметрическом виде. Это определяет модульную расширяемую структуру интерполятора. Структура обеспечивает наращивание алгоритмов интерполяции и их различные комбинации при обработке сложных траекторий в пространстве. Таким образом, реализация интерполятора предполагает возможность добавления новых модулей обработки траектории и связывания их с командами протокола обмена данными.

Другое важное условие реализации интерполятора – многопоточность. При обработке траектории существует несколько параллельных операций с разным приоритетом:

1. Обработка (преобразование в команды интерполятора) пакетов данных пользовательского приложения. Обработка должна происходить независимо от интерполяции и с опережением (то есть транслированные команды должны добавляться в список быстрее их обработки интерполятором).
2. Интерполяция (вычисление приращений координат за заданный такт времени).
3. Коммуникация с модулями ввода-вывода. В ходе коммуникации модулям отсылаются приращения координат, запрашивается текущее положение и другие данные. Кроме того, осуществляется управление электроавтоматикой.

Для каждой из этих операций выделяется отдельный поток, потому что реализация в одном потоке всех операций не позволяет осуществлять буферизацию данных интерполяции, что необходимо для обеспечения бесперебойного управления в режиме реального времени. Потоки управляются диспетчером. Предлагаемая структура интерполятора показана на рис. 5.

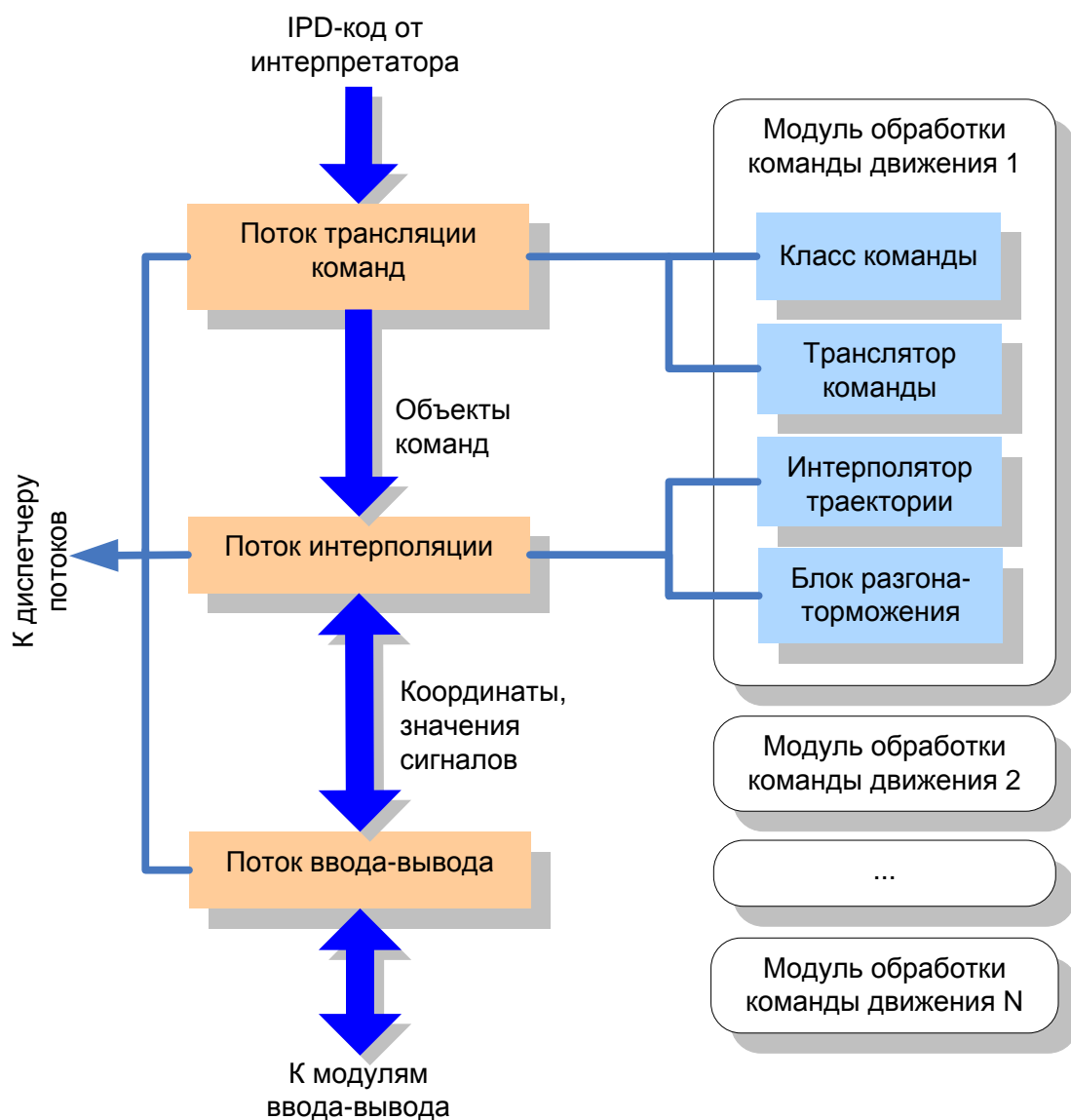


Рис. 5. Структурная схема интерполятора

При инициализации интерполятора происходит чтение настроек из конфигурационного файла, в котором прописываются следующая информация:

- набор модулей обработки для каждой команды. Команды при этом определяются номерами. Каждый модуль содержит необходимые для обработки команды механизмы: объектно-ориентированную структуру команды, транслятор, интерполятор и блок разгона-торможения;
- настройки диспетчера потоков (период и фаза запуска каждого потока);
- набор модулей ввода-вывода, требуемых для взаимодействия с объектом управления.

Каждая фаза расчета параметров движения закреплена за отдельным блоком подключаемого модуля обработки. Такая схема позволяет реализовать решение специфических задач управления движением благодаря полной открытости интерполятора.

**В третьей главе** предложено решение задачи построения интерпретатора структурированного языка высокого уровня на основе

метода рекурсивного нисходящего анализа. Предложен способ интеграции интерпретатора в архитектурную модель системы ЧПУ в виде препроцессора, позволяющий реализовать поддержку языка высокого уровня без изменений базовых модулей системы ЧПУ.

Язык высокого уровня для создания управляющих программ системы ЧПУ используют при реализации сложных пользовательских циклов; оформлении фрагментов управляющей программы в виде параметрических функций; разработке управляющих программ для групповых технологий; организации диалога с оператором; создании специальных тестовых программ для проверки работоспособности приводов, входов/выходов электроавтоматики и системы ЧПУ в целом.

Рассмотрим структуру программы на языке высокого уровня (рис. 6).

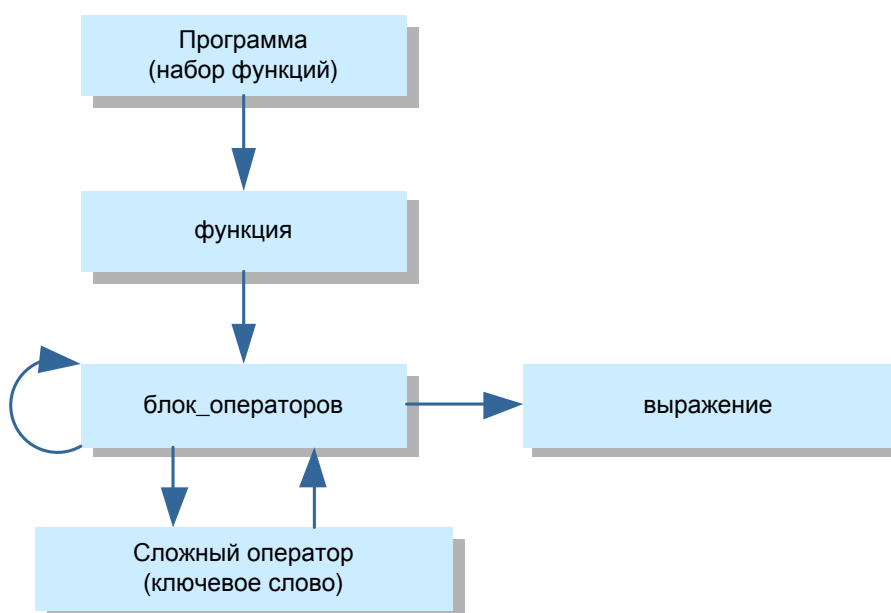


Рис. 6. Структура программы на языке высокого уровня

Программа состоит из набора функций, ее выполнение начинается вызовом главной функции. Каждая функция имеет блок (последовательность, заключенную в ограничивающие символы, например в фигурные скобки) выполняемых операторов. Блок операторов – это последовательность выражений и сложных операторов.

В обобщенном виде выполнение программы представляет собой рекурсивную интерпретацию блоков операторов и выражений.

Одним из самых эффективных и простых способов реализации интерпретатора является использование рекурсивного нисходящего синтаксического анализа. Схема работы синтаксического анализатора на базе этого метода определяется рекурсивной логикой вычисления выражений структурированного языка. На рис. 7 представлена обобщенная блок-схема алгоритма интерпретации управляющей программы на структурированном языке высокого уровня по методу рекурсивного нисходящего анализа.

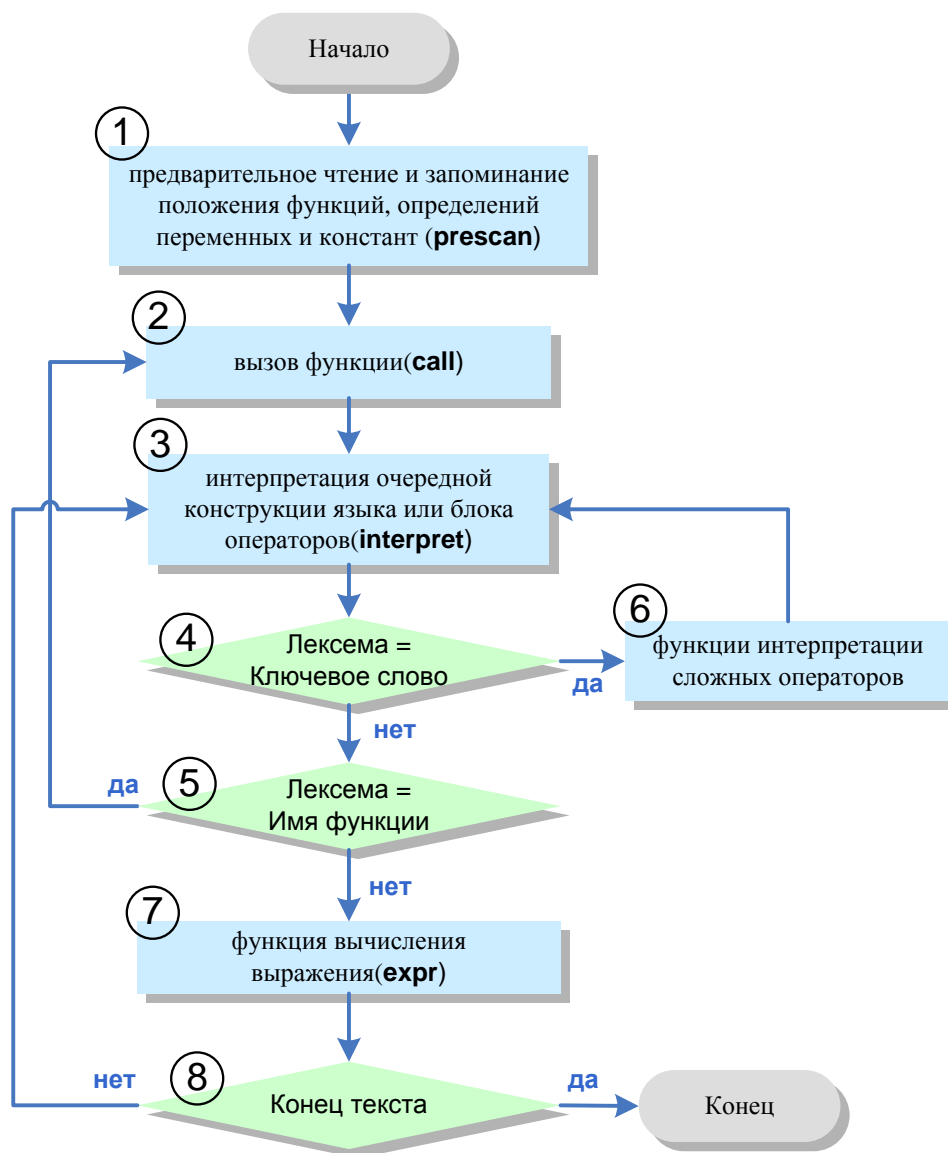


Рис. 7. Алгоритм интерпретация программы на языке высокого уровня

Последовательность выполнения алгоритма:

1. Осуществляется чтение всех функций, включаемых файлов, определений переменных и констант (prescan, №1).
2. Производится вызов главной функции программы (call, №2).
3. Интерпретируется очередная конструкция тела функции (interpret, №3).
4. Функция interpret интерпретирует очередную конструкцию тела функции (№3). При этом выполняется проверка лексемы (№4) Если встретилось ключевое слово, определяющее оператор, вызывается нужная функция обработки оператора (№6), в противном случае выполняется еще одна проверка (№5). Если лексема является именем функции, производится вызов(№2). В противном случае обрабатывается выражение (№7).
5. Выполняется проверка лексемы (№8). Если оказалось, что текст закончился (или встретился конец блока операторов), интерпретация завершается. Если нет, интерпретируется очередная конструкция тела функции (interpret, №3).



В работе предложено интегрировать интерпретатор языка высокого уровня в качестве надстройки (препроцессора) над имеющимся в системе интерпретатором языка ISO-7bit, что позволило сохранить структуру модулей и конвейер обработки данных без изменений. Место препроцессора в структуре системы ЧПУ можно представить следующей схемой (рис. 8).

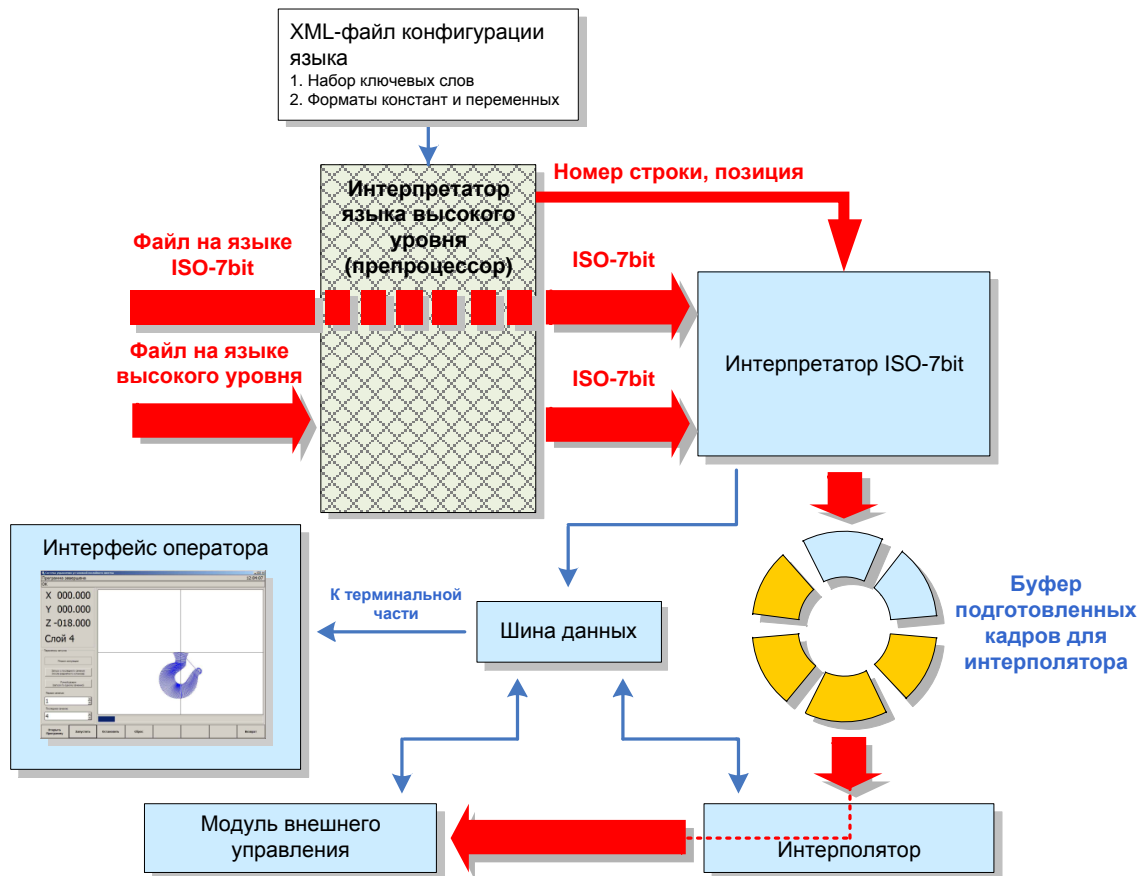


Рис. 8. Интеграция препроцессора в структуру системы ЧПУ

Файлы управляющей программы на языке ISO-7bit пропускаются через препроцессор без обработки и передаются интерпретатору. Файл на языке высокого уровня обрабатывается препроцессором, а полученные строки в коде ISO-7bit передаются интерпретатору.

Препроцессор настраивается с помощью файла конфигурации языка в формате XML. В файле описаны: лексемы структурных элементов языка; соответствие между входными и выходными командами языка ISO-7bit, что позволяет настроить препроцессор на обработку файлов разных диалектов ISO-7bit.

Предложенная схема интеграции позволяет реализовывать поддержку языков высокого уровня без изменения базовых модулей системы ЧПУ.

**В четвертой главе** представлена разработка архитектуры интерполятора и алгоритмов управления движением для лазерной обработки сложных контуров. Описаны практические аспекты реализации интерполятора (объектно-ориентированная структура модулей, наборы классов и связи между ними, механизм диспетчеризации потоков).

Задачи адаптация геометрической задачи для импульсной лазерной обработки и обеспечения открытости интерполятора для конечного пользователя требуют применения обобщенного подхода к обработке контуров, заданных в параметрическом виде. При этом ошибки интерполяции, накапливаемые при проходе контура, не могут компенсироваться во время движения. Таким образом, стоит задача разработки алгоритма, позволяющего с точностью до дискреты интерполяции вычислять приращения координат на каждом такте движения от начала и до конца траектории в кадре без накопления ошибки. Чтобы найти координаты точки сплайна, в которую надо переместиться за такт интерполяции, требуется вычислить приращение параметра за время такта. Для решения поставленной задачи предлагается разработать алгоритм итеративного приближения к заданной точке (рис. 9).

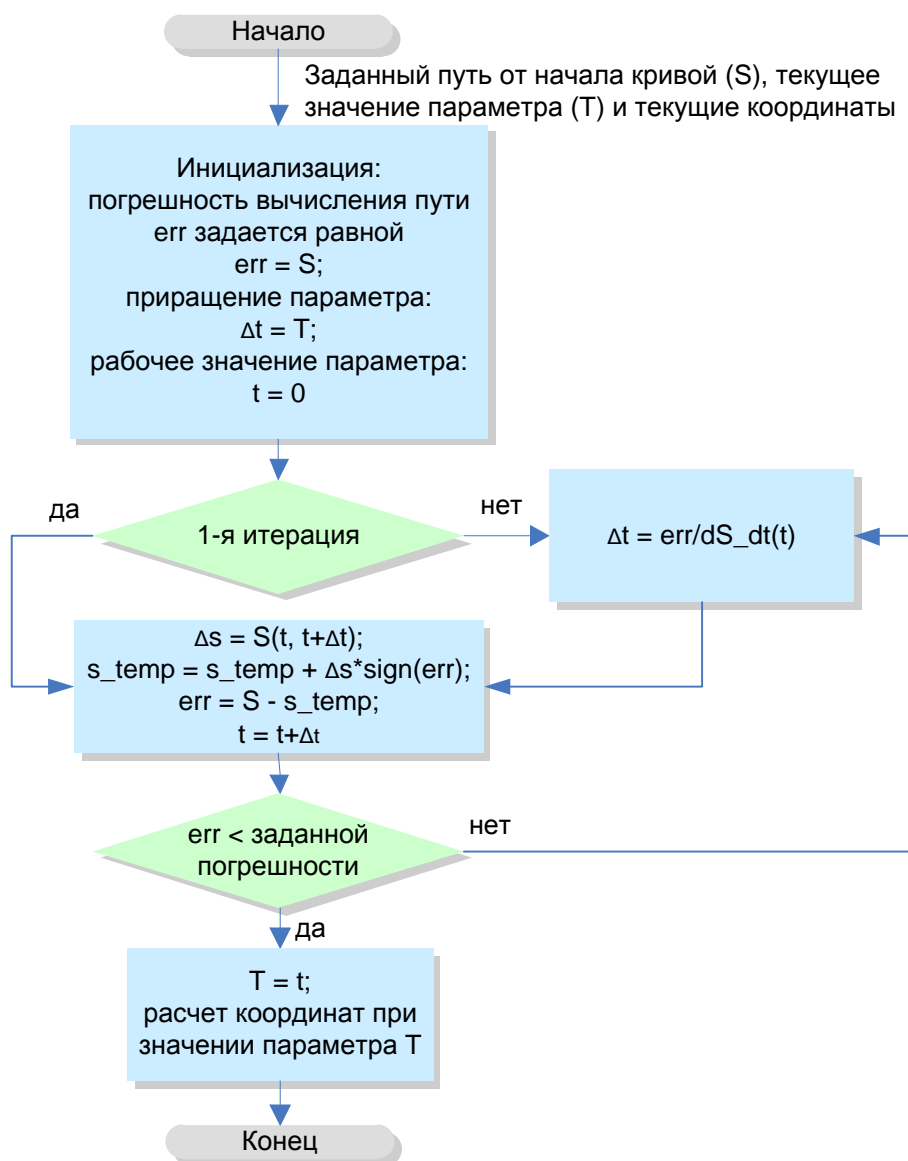


Рис. 9. Алгоритм интерполяции для параметрических кривых

Основные параметры алгоритма показаны на пояснительной схеме (рис. 10).

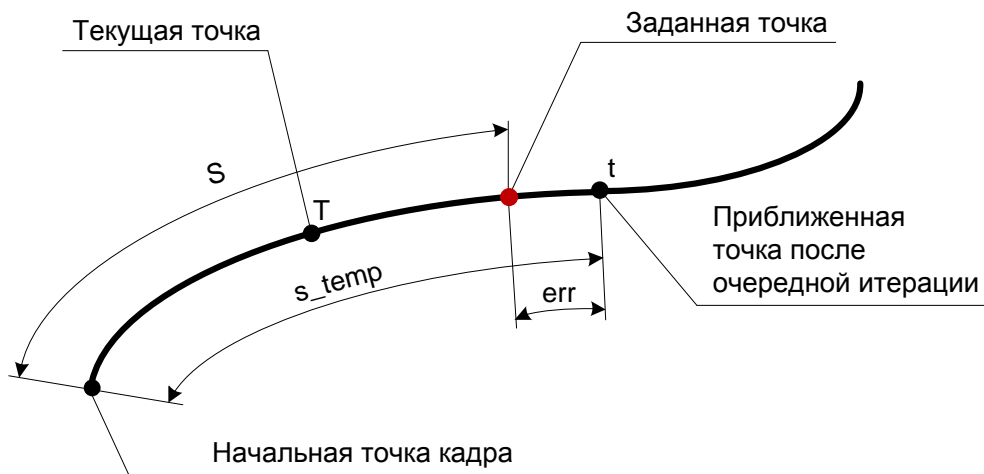


Рис. 10. Пояснительный рисунок к схеме алгоритма интерполяции

На первом шаге задается несколько переменных:  $s\_temp$  – путь от начала кадра до приближенной точки; переменная  $err$ , которая определяет разность между требуемой длиной пути  $S$  и полученной в ходе поиска  $s\_temp$ ; приращение параметра  $\Delta t$  (в начале задается равным параметру текущей точки  $T$ ); значение параметра  $t$  приближенной точки.

На втором шаге (активном со второй итерации) вычисляется приращение параметра  $\Delta t$ , соответствующее пути, равному  $err$ .  $\Delta t$  вычисляется как отношение  $err$  к производной пути по параметру в точке  $t$ .

Далее вычисляются: приращение пути  $\Delta s$ , определяемое значением  $\Delta t$ ; путь  $s\_temp$ ; ошибка пути  $err$ . Если  $err$  меньше заданной погрешности, текущее значение параметра принимается равным  $t$  и координаты заданной точки вычисляются исходя из этого значения. В противном случае происходит переход ко второму шагу.

Таким образом, переменная  $t$  итеративно приближается к значению, соответствующему длине кривой  $S$  от начала кадра с допустимой погрешностью. Как правило, для достижения заданной точности до 1 дискреты интерполяции достаточно 2-3 итераций. Этот алгоритм подходит для любых гладких кривых, заданных в параметрическом виде. Длина кривой  $S(t)$  для данного алгоритма находится методом приближенного вычисления интеграла. Точность интегрирования обеспечивается с помощью апостериорных методов оценки погрешности.

Основная проблема существующих алгоритмов разгона и торможения при импульсной обработке заключается в необходимости остановок в обрабатываемых точках. Стоит задача разработки усовершенствованного алгоритма управления движением, позволяющего обеспечить синхронизацию движения с импульсами лазера при максимально допустимой скорости прохода точек. Синхронизация движения подразумевает, что путь между двумя рабочими точками должен быть пройден за время, определяемое номинальной частотой импульсов и ее допустимой погрешностью.

Рассмотрим схему, которая отражает сопряжение алгоритма опережающего просмотра и алгоритма синхронизации параметров движения с параметрами импульсов (рис. 11).

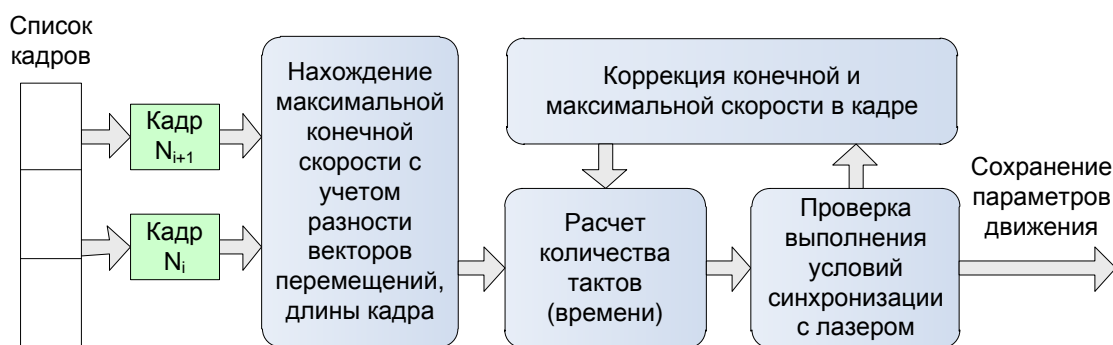


Рис. 11. Схема работы блока разгона и торможения

Перед началом движения в кадре вычисляются параметры функции разгона/торможения. После этого подсчитывается количество тактов, требуемое для прохождения кадра, и проверяются два условия:

1. Попадание в очередное временное окно, соответствующее допуску частоты лампы накачки лазера.
2. Количество тактов  $N \geq n_{nom} * k + n_{max\_syn}$ . Здесь  $n_{nom} * k$  – количество тактов, равное целому числу номинальных периодов импульсов;  $n_{max\_syn}$  – предельное значение частоты импульсов накачки. Допускается за несколько тактов до рабочего импульса лазера произвести холостой импульс с повышенной частотой, поэтому первый импульс кадра можно производить через  $n_{max\_syn}$  тактов от начала движения.

Если эти условия выполнены, параметры движения сохраняются и процесс анализа кадра прекращается. В противном случае производится уменьшение конечной и максимальной скорости в кадре и процесс повторяется. Таким образом, происходит итеративная подстройка времени пробега кадра ко времени, кратному периоду импульсов. Сравнение работы существующего и разработанного алгоритмов управления движением при импульсной обработке проиллюстрировано на рис. 12.

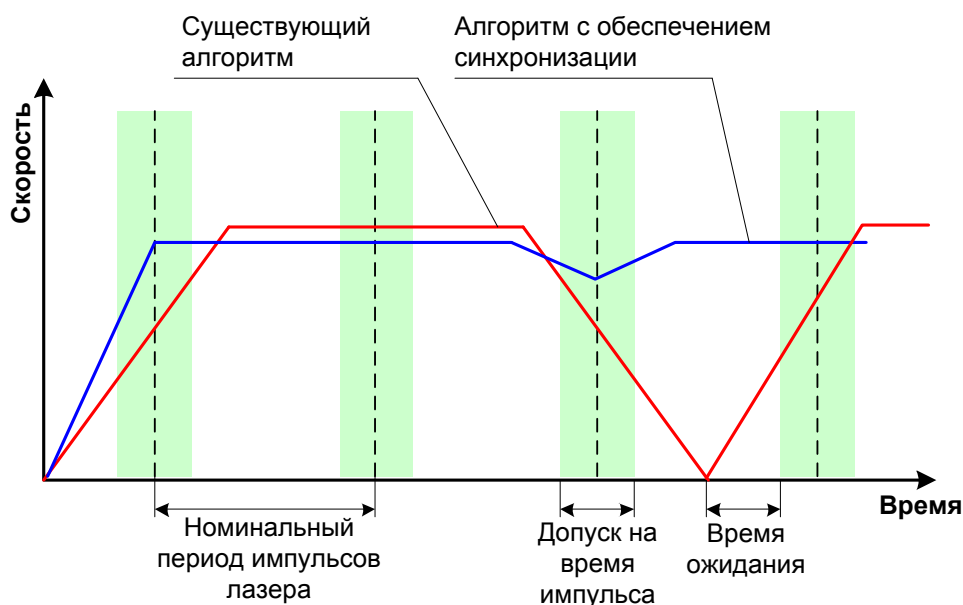


Рис. 12. Уменьшение времени прохода кадра при синхронизации с лазером

Предложенный алгоритм дает возможность сократить время обхода траектории, так как коррекция скорости позволяет достичь рабочей точки точно ко времени осуществления импульса лазером. Сочетание алгоритма опережающего просмотра (look ahead) и алгоритма синхронизации позволяет поддерживать максимальную контурную скорость с учетом пороговых ускорений по осям. Используемые параметры, такие как частота лазера и ее допустимая погрешность, максимальные ускорения по осям и т. д, могут настраиваться наладчиком станка, что позволяет экспериментально находить оптимальное соотношение производительности и качества обработки.

**В пятой главе** описана проверка достоверности результатов работы на основе сравнения теоретических данных с данными, полученными при проведении экспериментальных исследований, а также на основе анализа выходных управляющих сигналов системы ЧПУ.

Проверка достоверности полученных результатов работы производилась с целью:

- подтверждения соответствия реализованных алгоритмов интерполяции аналитическому представлению интерполируемых кривых;
- проверки практической применимости разработанных алгоритмов управления движением;
- оценки влияния разработанных алгоритмов на эффективность импульсной низкочастотной обработки.

Использовались как тестовые управляющие программы, так и специальные утилиты для анализа выдаваемых системой сигналов.

Проверка алгоритмов сплайновой интерполяции проводилась с помощью утилиты, генерирующей эталонные кривые, которые сравнивались с кривыми, построенными на основе выходных данных интерполятора.

Путем программных измерений вычислено время, необходимое для расчета всех параметров движения за такт интерполяции. На основе этого оценена максимальная частота выдачи управляющих сигналов на приводы при разных типах запрограммированных траекторий - до 10 кГц при использовании кривых NURBS и кубических сплайнов, до 50 кГц при использовании простых линейных и круговых кадров (однако, в реальных приложениях частота составляет, как правило, не более 20 кГц ввиду ограничений современных операционных систем реального времени и используемых приводов подачи).

Реализованные алгоритмы управления движением позволяют перемещать пятно луча лазера с постоянной скоростью на гладких кривых траекториях, что важно для многих способов лазерной обработки, требующих неизменных температурных условий вдоль траектории обработки. Рис. 13 демонстрирует обеспечение постоянной высокой скорости для последовательности любых поддерживаемых системой сегментов, объединенных в гладкую траекторию (последовательность линейных, круговых, кубических и NURBS кадров). Ступенчатые отклонения на графике – это следствие дискретности выходного сигнала интерполятора.

По вертикальной оси обозначено количество дискрет интерполятора (в рассматриваемом случае дискрета равна 1 мкм).

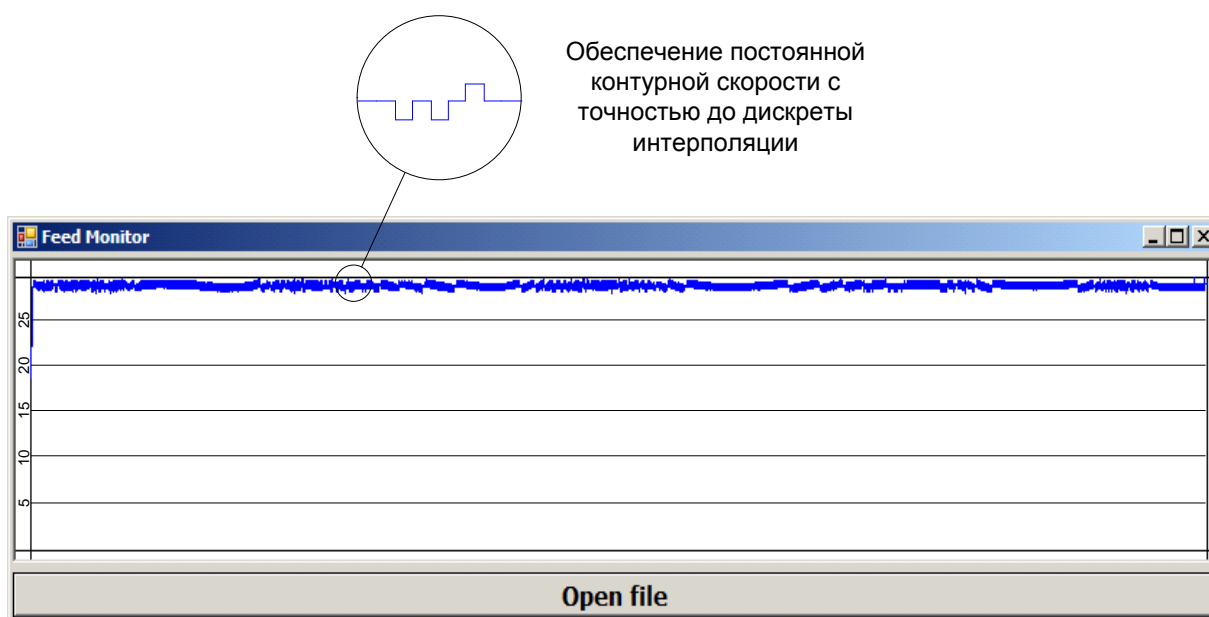


Рис. 13. График скорости для последовательности кадров, составляющих кусочно-гладкую траекторию

Алгоритм опережающего просмотра ограничивает скорость между кадрами в соответствии с пороговым ускорением. На рис. 14 показан график для последовательности коротких кадров, составляющих ломаную траекторию. Скорость ограничивается предельным ускорением, но не снижается до нуля. Разработанный алгоритм позволяет значительно поднять среднюю скорость прохождения сложной ломаной траектории по сравнению с существующим алгоритмом управления, применяющимся при импульсной обработке.

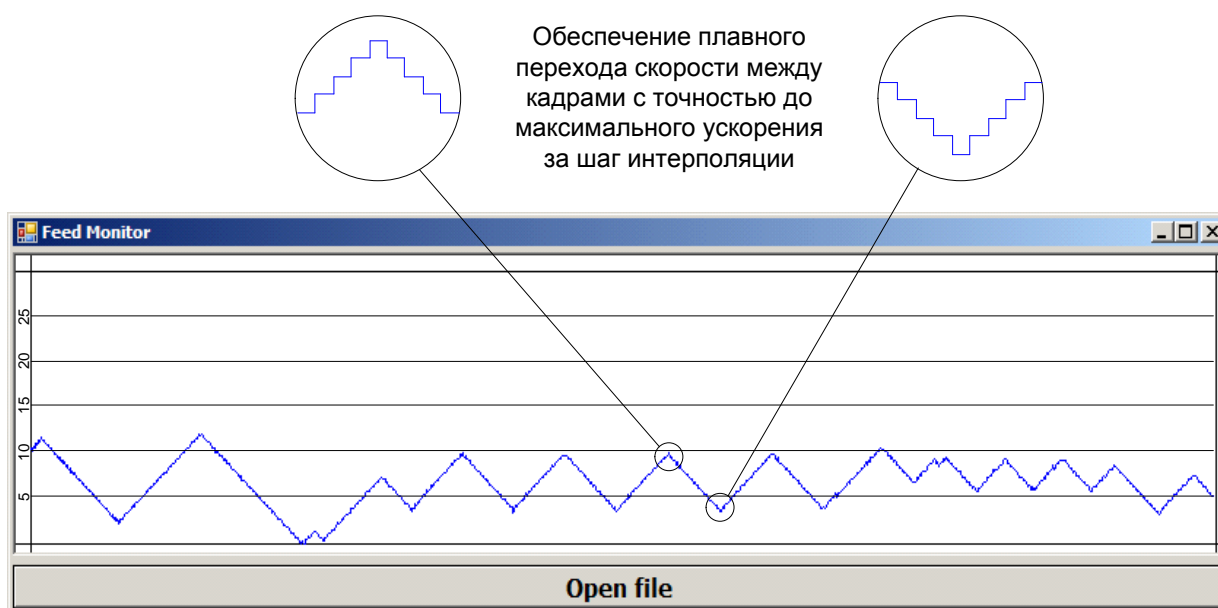


Рис. 14. График скорости для последовательности коротких (10-200 мкм) кадров

Оценка влияния разработанных алгоритмов на эффективность импульсной низкочастотной обработки была проведена на станках лазерной графики в прозрачных средах фирмы LaserGraphicArt при различных параметрах движения.

Во-первых, спрогнозируем аналитически, какие преимущества может дать алгоритм, обеспечивающий синхронизацию движения с лазерным излучением. Рассматриваемые станки имеют следующие основные характеристики:

- номинальная частота импульсов при обработке изделия: 40 Гц;
- рекомендуемое ускорение стола с заготовкой и блока лазера: 300 мм/с<sup>2</sup>;
- номинальное значение подачи: 1800 мм/мин;

Расстояние между обрабатываемыми точками составляет 100-150 мкм, что не позволяет станку при старте с нулевой скорости достичь номинального значения подачи, как видно из выражения (1):

$$S = \frac{At^2}{2} = \frac{A \left(\frac{F}{A}\right)^2}{2} = \frac{0,3 \left(\frac{0,03}{0,3}\right)^2}{2} = 0,0015\text{ м} = 1500 \text{ мкм}, \quad (1)$$

где S – путь, необходимый для разгона до номинальной подачи, A – номинальное ускорение, F – подача, t – время. Все значения переведены в единицы СИ. Таким образом, путь разгона в 10 раз больше типичного расстояния между точками. Отсюда следует, что график изменения скорости в кадре имеет вид равнобедренного треугольника. Исходя из этого, найдем время t, требуемое для прохождения половины кадра (2):

$$S = 2 \times \frac{At^2}{2}, \text{ откуда } t = \sqrt{\frac{S}{A}} = \sqrt{\frac{0,00015}{0,3}} \approx 0,02 \text{ с} \quad (2)$$

Отсюда следует, что полное время прохождения кадра приблизительно равно 40 мс. В то же время, период импульсов, соответствующий номинальной частоте 40 Гц, равен 25 мс. Таким образом, среднее время прохождения кадра при отсутствии синхронизации движения с излучением составляет 2 периода импульсов лазера с учетом того, что после останова станок находится в состоянии ожидания очередного импульса  $25 \times 2 - 40 = 10$  мс.

Номинальное значение подачи позволяет пройти кадр за время, заведомо меньшее одного периода излучения, если скорость в кадре поддерживается постоянной (3):

$$S = Ft, \text{ откуда } t = \frac{S}{F} = \frac{0,00015}{0,03} \approx 0,005 \text{ с} \quad (3)$$

Таким образом, использование алгоритма опережающего просмотра, обеспечивающего проход точек без торможения за счет синхронизации движения с излучением, теоретически может дать значительный прирост

производительности (вплоть до двукратного на длинных прямых участках для лазерного станка с указанными выше характеристиками).

Экспериментальные проверки показали, что разработанный алгоритм действительно позволяет существенно повысить производительность обработки низкочастотным излучением. В Таблице 2 сведена информация о времени обработки для 14 файлов управляющих программ (с разным количеством точек) при использовании существующего алгоритма управления движением и разработанного алгоритма, обеспечивающего синхронизацию движения с импульсами лазера. Сравнение проведено при номинальных параметрах обработки (частота импульсов: 40 Гц; допустимое ускорение: 300 мм/с<sup>2</sup>; максимальная подача: 1800 мм/мин; расстояние между обрабатываемыми точками: 100-150 мкм.). Количество точек округлено до сотен.

Таблица 2. Результаты измерения времени обработки изделий на лазерном станке

<b>№ Файла</b>	<b>Количество точек</b>	<b>Время обработки, мин:сек (существующий алгоритм)</b>	<b>Время обработки, мин:сек (разработанный алгоритм)</b>
1	34800	30:11	18:15
2	12100	10:29	7:01
3	23200	20:19	14:08
4	108400	92:08	48:16
5	65200	55:36	31:14
6	30900	26:12	16:01
7	38600	33:19	24:02
8	8600	7:52	4:58
9	26700	23:28	13:36
10	52000	44:26	28:13
11	31200	26:51	17:54
12	28000	23:49	14:28
13	35200	30:43	19:45
14	21100	18:17	10:11



Результаты сравнения в графическом виде представлены на рис. 15:

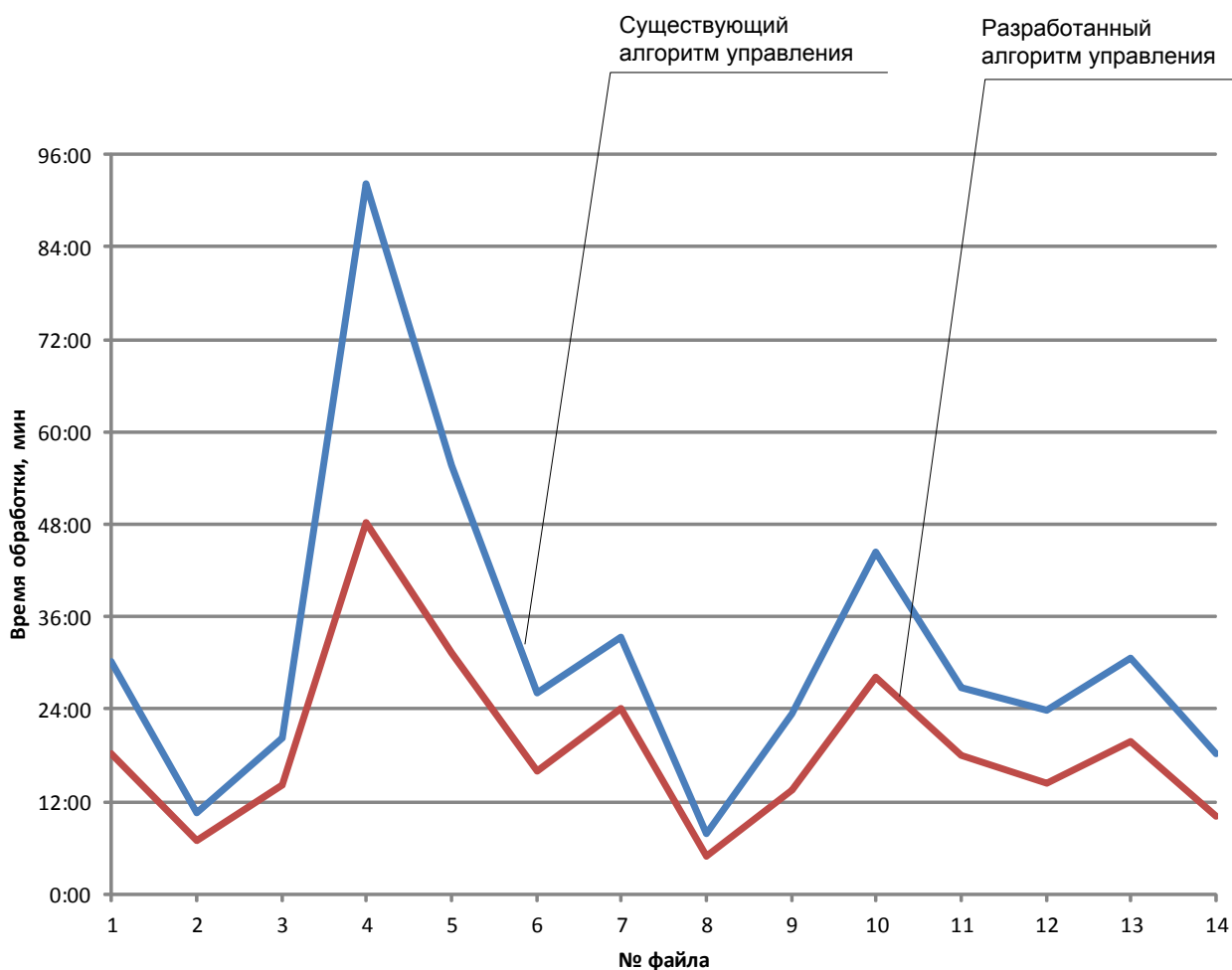


Рис. 15. Зависимость времени обработки от ускорения для двух алгоритмов

Из полученных данных следует, что разработанный алгоритм управления, обеспечивающий синхронизацию движения с импульсами лазера, позволил снизить время обработки изделий на импульсном лазерном станке на 30 - 50 % по сравнению со стандартной позиционной схемой управления с остановками в конечных точках кадров.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В работе решена задача, имеющая существенное значение для машиностроения, заключающаяся в разработке метода обеспечения гибкости систем ЧПУ лазерного технологического оборудования на основе обобщенного модульного архитектурного решения, позволяющего компоновать и расширять систему управления для конкретных технологических задач.

2. Установленные взаимосвязи между аппаратными и программными компонентами лазерных станков с ЧПУ позволили выделить совокупность общих модулей, необходимых для построения базовой системы управления широким классом лазерного технологического оборудования.
3. На основании установленных взаимосвязей разработана архитектурная модель обобщенной системы ЧПУ для управления установками лазерной маркировки, графики в прозрачных средах, послойного синтеза и комбинированной механо-лазерной обработки, основанная на архитектуре системы управления класса PCNC.
4. Разработаны алгоритмы опережающего просмотра траектории и управления движением по параметрическим кривым для импульсных лазерных станков, позволяющие исключить остановки в обрабатываемых точках и обеспечить постоянную контурную скорость. Применение разработанных алгоритмов приводит к сокращению времени обработки на 30-50% на станках с приводами подачи по сравнению с использованием алгоритмов, не учитывающих синхронизацию движения с импульсами лазера.
5. Построение интерпретатора структурированного языка управляющих программ высокого уровня на основе метода рекурсивного нисходящего анализа обеспечило возможность применения параметрического программирования при сохранении совместимости с программами в коде ISO-7bit. Предложенный способ интеграции интерпретатора в архитектурную модель системы ЧПУ в виде препроцессора позволил реализовать поддержку языка высокого уровня без изменений базовых модулей системы ЧПУ.
6. Созданные в рамках диссертационной работы программные компоненты позволили на единой программно-аппаратной платформе практически реализовать управление комбинированной механо-лазерной обработкой (система AxiOMA Ctrl), маркировкой и графикой в прозрачных средах (система ArtNC), а также послойным порошковым синтезом (система AxiOMA Laser Ctrl).
7. Разработанная методика компоновки системы управления для задач лазерной обработки на основе предложенного единого архитектурного решения позволяет сократить время и себестоимость процесса разработки систем управления для лазерных станков.
8. Полученные теоретические и практические результаты рекомендуется применять на предприятиях машиностроительного профиля, использующих лазерное технологическое оборудование, а также в учебном процессе по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств» (220700).

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Мартинов Г.М., Любимов А.Б., Обухов А.И. Проблема адаптации систем ЧПУ класса PCNC к станкам лазерной графики // Мехатроника, автоматизация, управление. №1, 2009 г., С. 59-62.
2. Мартинов Г.М., Обухов А.И., Пушков Р.Л. Принцип построения универсального интерпретатора языка программирования высокого уровня для систем ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. № 6, 2010 г., С. 42-50.
3. Нежметдинов Р.А., Соколов С.В., Обухов А.И., Григорьев А.С.. Расширение функциональных возможностей систем ЧПУ для управления механо-лазерной обработкой // Автоматизация в промышленности. №5, 2011 г., С. 49-53.

*Другие публикации автора:*

4. Обухов А. И. Диспетчеризация потоков реального времени в однокомпьютерной системе ЧПУ // Труды XIV международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии». Секция «Информатизация в машиностроении», ГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 17-19 октября 2006 г.
5. Мартинов Г.М., Обухов А.И., Воскресенский К.Д. Современные технологии обработки поверхностей свободной формы на станках с ЧПУ // Труды международной конференции «Перспективы использования новых технологий и научно-технических решений в ракетно-космической и авиационной промышленности», «AEROSPACE - 2008», 20-24 августа 2008 г.
6. Обухов А. И., Соколов С.В., Трофимов Е.С. Построение системы числового программного управления для установки послойного синтеза из порошковых материалов // Труды XVIII международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии». Секция «Информатизация в машиностроении», ГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 19-21 октября 2010 г.
7. Соколов С.В., Обухов А.И., Пушков Р.Л., Евстафиева С.В., Нежметдинов Р.А. Многофункциональная система управления мехатронными объектами // Материалы 7-й научно-технической конференции «Мехатроника. Автоматизация. управление» (МАУ-2010), СПб, 12-14 октября 2010 г.
8. Обухов А.И. Принцип реализации сплайнового интерполятора системы ЧПУ // Труды 2-й Международной Интернет-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов INNOTECH 2010. Пермь, декабрь 2010 г.