На правах рукописи

Пушков Роман Львович

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ПОДГОТОВКИ И ОТЛАДКИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПРОГРАММ ДЛЯ СИСТЕМ ЧПУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ МЕХАНООБРАБОТКИ

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2018 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»).

Научный руководитель: **Мартинов Георги Мартинов**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», заведующий кафедрой компьютерных систем управления.

Официальные оппоненты: **Чадеев Валентин Маркович**
доктор технических наук, профессор, ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории № 41 «Идентификации систем управления»;

Сахарова Ольга Петровна
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ПАО «Экспериментальный научно-исследовательский институт металлорежущих станков», заведующая отделом комплексной технологии.

Ведущая организация: ОАО «Национальный институт авиационных технологий», г. Москва.

Защита диссертации состоится «25» февраля 2019 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.142.03 при ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» по адресу: 127994, г. Москва, Вадковский переулок, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», www.stankin.ru.

Автореферат разослан «____» _____20__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.142.03,
к.т.н. Тюрбеева Татьяна Борисовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сокращение сроков разработки управляющих программ для современного машиностроительного оборудования обусловлено необходимостью скорейшего выпуска новой продукции на рынок.

В большинстве случаев предприятиям, производящим конкурентоспособную продукцию, при самостоятельном производстве необходимо иметь парк дорогостоящего оборудования, часть из которого может быть уникальным, выполняющим необходимые операции, но работающим малую часть производственного цикла деталей. Это отрицательно сказывается на экономических показателях предприятия и себестоимости продукции.

Зарубежные производители в различных сферах еще в 70-е годы начали переходить к концепции контрактного производства. В 90-е годы эта концепция начала внедряться и отечественными производителями, и в настоящее время наблюдается ежегодный существенный рост доли контрактного производства. Суть контрактного производства состоит в том, что изготовление продукции передается другим предприятиям, которые принимают к реализации множество различных заказов и имеют возможность загрузить оборудование полностью.

Однако контрактное производство имеет свои особенности. Номенклатура изделий постоянно меняется, изделия производятся мелкими сериями, а, зачастую, вообще преобладает единичное производство.

В таких условиях необходимо оперативно реагировать на рынок и быстро разрабатывать управляющие программы для станков с ЧПУ.

Большинство современных разработчиков программного обеспечения и производителей систем ЧПУ предлагают различные решения для разработки управляющих программ. Самым простым решением является применение CAD/CAM систем (Siemens NX, SolidWorks, Pro/Engineer, PTC Creo). Некоторые производители предлагают пакеты цехового визуального программирования (Siemens: ShopMill, ShopTurn, Heidenhain: Dialog). Практически все (зарубежные – Siemens, Rexroth Bosch, Fanuc, отечественные - «Балт-Систем») производители внедрили в свои системы подобие алгоритмического языка высокого уровня.

Первые два решения имеют ряд серьезных недостатков для внедрения в условиях контрактного производства. CAD/CAM-системы очень дороги, кроме того, должны содержать в себе дополнительные постпроцессоры для каждой системы ЧПУ, на которой планируется запускать управляющие программы. Разработка постпроцессора для конкретного диалекта языка – отдельная, сложная, дорогостоящая задача, поэтому часто ограничиваются стандартным набором функций, представляя кривые в виде кусочно-линейной интерполяции. Малейшие исправления в размерах, форме или технологии производства деталей производятся изменением трехмерной модели и полным перестроение управляющей программы. Пакеты цехового программирования поддерживают только ограниченный, разработанный производителем набор функций.

Встраивание собственных циклов и наработок в них является очень сложной задачей.

Третий подход состоит в применении языков программирования высокого уровня. Современные системы ЧПУ реализуют возможность работы с языками программирования 3-го поколения (по типу C, PASCAL, BASIC). Применение данных языков позволяет создавать гибкие параметрические управляющие программы, работать с переменными в процессе выполнения программ, организовывать библиотеки подпрограмм и станочных циклов для многократного применения. Тем не менее, использование алгоритмических конструкций, работа с переменными и подпрограммами усложняет разработку и отладку таких программ. Для персональных компьютеров существует набор специализированного программного обеспечения, которое позволяет отлаживать программы, следя за их выполнением изнутри. В силу специфики управляющих программ (применение, наряду с алгоритмическими конструкциями, специфичных для систем ЧПУ элементов: кода ISO-7bit, таблиц параметров инструмента, коррекции ШВП и других) невозможно просто взять данный инструментарий и адаптировать его для систем ЧПУ. Необходимо разработать отдельный подход к созданию подобного инструментария.

В качестве дополнительной задачи, возможно применение языка высокого уровня не только для разработки управляющих программ для производства деталей, но и разработка программ для тестирования и пусконаладки станочного оборудования.

Степень разработанности исследования. Проблемами разработки групповых технологических процессов, построения систем управления, в том числе в области управления технологическими процессами механообработки, посвящены труды ученых Ю.М. Соломенцева, В.Л. Сосонкина, Г.М. Мартинова, М.М. Аршанского, Г. Олссона (G. Olsson), В.Г. Митрофанова и др. Работы перечисленных авторов содержат теоретические основы разработки групповых технологических процессов, различных видов систем управления технологическими процессами. В трудах вышеперечисленных ученых проведен обширный анализ имеющихся на рынке решений, четко прописаны методы построения, описаны принципы работы распределенных систем управления, имеющих открытую модульную архитектуру и базирующихся на кроссплатформенных решениях. Описаны тенденции развития в данной области. Рассмотрены основные принципы построения систем управления технологическими процессами и производствами, их программирования, настройки и конфигурирования. Показано, что для определенного класса сложных задач применяются системы с расширенными аппаратными возможностями для поддержания дополнительных программных модулей.

Однако вопросы редактирования и отладки управляющих программ, в особенности на языках высокого уровня, исследовались не в полном объеме: не рассматривался систематизированный подход к процессам отладки управляющих программ на том же уровне, на каком отладка программ

производится при разработке программного обеспечения для персональных компьютеров.

Цель работы. Сокращение времени программирования систем ЧПУ технологического оборудования за счет применения специализированного инструментария для редактирования и отладки управляющих программ на языках высокого уровня.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

1. проанализировать существующие подходы разработки и отладки управляющих программ на языках высокого уровня для современных систем ЧПУ;
2. разработать обобщенную модель языка высокого уровня для управляющих программ, определить требования к инструментарию отладки и редактирования, определить набор необходимых компонентов;
3. сформировать структуру и разработать архитектурную модель инструментария подготовки и отладки управляющих программ на языке высокого уровня;
4. разработать методику создания параметрических программ, станочных и измерительных циклов и групповой технологии с использованием инструментария;
5. реализовать на базе языка высокого уровня и инструментария прикладные решения для: синхронизации управляющих программ для нескольких каналов управления, проведения стандартизованных испытаний станка, создания станочных циклов и групповых технологий, построения электронной гитары.

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

1. установлены взаимосвязи между характеристиками языков программирования для персональных компьютеров и языка высокого уровня управляющих программ систем ЧПУ, позволяющие определить необходимый состав и структуру модулей инструментария редактирования и отладки управляющих программ;
2. на основе установленных взаимосвязей построена структурная схема инструментария подготовки и отладки управляющих программ на языке высокого уровня, определяющая клиент-серверную архитектуру и разработана архитектурная модель инструментария, отличающаяся тем, что его конфигурирование производится в зависимости от синтаксиса используемого языка;
3. разработана обобщенная модель языка высокого уровня на базе расширенной формы Бэкуса-Наура, отличающаяся тем, что включает в себя минимально необходимый набор синтаксических элементов для реализации алгоритмических и специализированных конструкций, языков управляющих программ различных систем ЧПУ и компьютерных языков высокого уровня;

4. предложена методика создания параметрических подпрограмм, станочных и измерительных циклов и групповой технологии с использованием разработанного инструментария;
5. предложен механизм создания экранов интерфейса оператора на базе конфигурируемых масок.

Теоретическая значимость работы заключается в разработанных моделях, алгоритмах и предложенном способе создания инструментария для разработки и отладки управляющих программ на языке высокого уровня на основе заданных языковых возможностей систем ЧПУ, в зависимости от технического задания на язык управляющих программ и функциональных возможностей системы.

Практическая значимость работы заключается в:

1. созданном инструментарии для разработки и отладки управляющих программ на языке высокого уровня;
2. разработанной методике создания параметрических подпрограмм, станочных и измерительных циклов и групповой технологии;
3. разработанном наборе специализированных параметрических подпрограмм - станочных и измерительных циклов, обработки по групповой технологии;
4. разработанных формах интерфейса оператора на базе конфигурируемых масок.

Методы исследования. Теоретические исследования в диссертации базируются на основных положениях теории автоматического управления, теории автоматов, теории резания. При решении поставленных задач использовались методы объектно-ориентированного проектирования (декомпозиции, абстракции), концепция объектно-ориентированного программирования, а также технологии .NET, язык описания разметки XML (eXtensible Markup Language), сетевые технологии, подходы кроссплатформенной разработки, принципы разработки человеко-машинного интерфейса.

Положения, выносимые на защиту:

- обобщенная модель языка высокого уровня управляющих программ систем ЧПУ;
- структурная схема и архитектурная модель инструментальных средств построения и отладки управляющих программ на языке высокого уровня;
- методика создания параметрических подпрограмм, станочных и измерительных циклов, обработки по групповой технологии.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласованием теоретических и экспериментально полученных данных, апробацией разработанных моделей и алгоритмов в рамках разработки автономного решения и в варианте встраивания в систему ЧПУ.

Апробация работы. Теоретические и практические результаты, полученные автором, докладывались на заседаниях кафедры «Компьютерные системы управления» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Международной

научно-практической конференции "МАШИНОСТРОЕНИЕ: ИННОВАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ", II Международной научно-практическая конференции «Мехатроника, автоматика и робототехника», XI Всероссийской научно-практической конференции "Современные информационные технологии в науке, образовании и практике", VI Всероссийской научно-практической конференции "Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологий", XIX Международной научно-технической конференции "Информационные средства и технологии", IV Всероссийской мультиконференции по проблемам управления (МКПУ - 2011), Международных конференциях «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта» (CAD/CAM/PDM – 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017). Разработанный инструментарий в составе системы ЧПУ используется в учебном процессе на кафедре «Компьютерные системы управления» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» по дисциплинам «Распределенный мониторинг в корпоративных системах» и «Прикладное программирование».

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № 2.1237.2017/4.6, а также в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по теме «Методы декомпозиции и синтеза программных решений при создании распределенных компьютерных систем управления технологическими комплексами» (ГК № П901) и по теме «Построение многофункциональной системы числового программного управления промышленными лазерными системами» (ГК № П717), НИОКР по теме «Создание системы ЧПУ и электрооборудования для 4х-координатного обрабатывающего центра с горизонтальным шпинделем для обработки деталей 200х200х200 мм с погрешностями менее ±4 мкм», договор № 68-11.51М от 29.09.2011 между ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и станкостроительным предприятием ООО «ВСЗ «Техника». (подтверждено справкой об использовании результатов диссертационного исследования).

На основе результатов работы создано 12 объектов интеллектуальной собственности в виде свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Практические и теоретические разработки по данной теме отмечены дипломом XIV Международной Специализированной выставки Передовые Технологии Автоматизации "ПТА-2014", дипломом XIII Международной Специализированной выставки Передовые Технологии Автоматизации "ПТА-2013", медалью Ассоциации изобретателей и производителей Франции A.I.F.F. 112-го Международного салона изобретений "Конкурс Лепин", дипломом XII Международной Специализированной выставки Передовые Технологии Автоматизации "ПТА-2012", бронзовой медалью XV Юбилейного Международного салона изобретений и инновационных технологий "АРХИМЕД - 2012", дипломом XI Международной Специализированной выставки Передовые Технологии Автоматизации "ПТА-2011", золотой медалью

Международной выставки изобретений и инноваций INPEX 2011, серебряной медалью XIV Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий "АРХИМЕД-2011", дипломом X Юбилейной Международной Специализированной выставки Передовые Технологии Автоматизации "ПТА-2010", серебряной медалью XIII Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «Архимед – 2010».

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует формуле научной специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические системы)» в части п.п. 3, 18 в области исследования паспорта специальности.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 50 печатных работ (из них 17 в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК, 2 в журнале, индексируемом Web of Science и Scopus), включая тезисы докладов, опубликованные в рамках международных и региональных научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 96 наименований. Работа изложена на 172 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 5 таблиц, 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы по сокращению времени разработки и отладки управляющих программ для технологического оборудования, сформулированы цели и задачи исследования, раскрыто основное содержание научной новизны и практической значимости выполняемой работы.

В первой главе проанализированы возможности языков высокого уровня у ведущих зарубежных и отечественных производителей систем ЧПУ. При выборе систем ЧПУ для анализа учитывалось, что Siemens, Fanuc, Fagor и Heidenhain являются наиболее распространенными системами ЧПУ, Andronic предназначена для выполнения специализированных задач высокоскоростной обработки скульптурных поверхностей, а системы BoschRexroth построены по двухкомпьютерной схеме и являются классическим примером в области систем ЧПУ с открытой архитектурой.

Систематизирована информация о возможностях языков программирования различных производителей систем ЧПУ: возможность использования локальных, глобальных и перманентных переменных, возможность доступа к данным станка с помощью переменных, использование переменных различных типов, работа с массивами данных, уровень вложенности подпрограмм, наличие возможности модального вызова подпрограмм и подпрограмм, не загруженных в систему ЧПУ, работа с

макросами; описаны поддерживаемые виды циклов, а также поддержка ветвлений и безусловного перехода; выявлены допустимые уровни вложенности циклов и переходов; рассмотрена поддержка арифметических и логических операций, операции со строками и расширенной адресации; возможности вывода сообщений и работы с комментариями, работа с файлами; наличие возможностей трансформаций систем координат, сплайновой интерполяции, интеллектуального управления подачей, измерительных функций; возможности работы с параметрами инструмента, многоканального программирования и синхронизации осей, созданию пользовательского интерфейса и заданию защищенных зон. На основании этого анализа выявлены возможности, которые должны присутствовать в обобщенном языке программирования высокого уровня.

В таблице 1 приведены основные средства для отладки управляющих программ, присутствующие в рассмотренных системах.

Таблица 1 – Фрагмент таблицы анализа возможностей языков высокого уровня различных систем управления

Характеристики	Siemens Sinumerik 840D	Fanuc Fanuc 30i	Andronic 2060, 3060	Bosch Rexroth IndraMotion MTX	Fagor 8070	Балт-систем NC-1xx,2xx,3xx	Модмаш FMS-3000	Heidenhain iTNC530
Локальные и глобальные переменные	да	да	да	да	да	да	частично	да
Модальный вызов подпрограмм	да	да	нет	да	да	да	нет	да
Работа с макросами	да	нет	частично	нет	да		да	да
Допустимая вложенность циклов и переходов	8 (в пределах каждой подпрограммы)	5	В ANSI-C не ограничено	10 для CASE	не ограничено	не более 2	не более 50	1000-9999
Трансформация СК	да	нет	да	да	да	да	да	да
Сплайновая интерполяция	да	нет	только в Anlog-C	да	да	+ (С-сплайны)	нет	да
Интеллектуальное управление подачей	да	нет	нет	нет	да		да	да
Измерительные функции	да	нет	нет	нет	да	да	да	да
Многоканальное программирование	да	нет	только в Anlog-C	да	да	да	нет	нет
Средства отладки УП	Dry-Run режим, моделирование контура во встроенном в системе графическом эмуляторе	Dry-Run режим	Dry-Run режим, отладка программы на Anlog-C в специальной среде программирования	Dry-Run режим, в режиме отладки: простановка точек останова в программе и отслеживание переменных на чтение и запись, приложение отладки CPL-Debugger	режим отслеживания коллизий, трехмерное изображение заготовки и детали в процессе ее обработки	проверка программы без движения осей, ускоренная отработка без детали, трехмерное изображение заготовки и детали в процессе ее обработки	отработка с отключением осей, отработка с технологическим остановом, отработка с блокировкой технологических функций, отработка с блокировкой перемещения осей	динамический контроль столкновений DCM, 3D-визуализация с отображением перемещения инструмента

При анализе языков программирования было выявлено, что управляющие программы, хотя и подчиняются единому стандарту, практически непереносимы с одного станка на другой. Это объясняется тем, что производители систем ЧПУ адаптируют стандарт для своих нужд. К тому же трудоемкость создания программ для деталей со сложным контуром, а также повторяющимися элементами контура, остается очень большой. Отсутствие единого стандарта обусловливает разные степени реализации языков высокого уровня со стороны производителей систем управления. При этом процесс

отладки и поиска ошибок чрезвычайно сложен, что объясняется разветвленностью алгоритма управляющей программы, наличием специфичных языковых конструкций и использованием переменных. Это позволило сформулировать цель и задачи исследования.

Во второй главе на основе сравнительного анализа языков программирования систем управления построена обобщенная модель языка высокого уровня для управляющих программ в виде формального графического представления в расширенной форме Бэкуса – Наура, включающая в себя минимально необходимый набор синтаксических элементов для реализации алгоритмических и специализированных конструкций, с возможностью многоканального программирования. Определены ключевые функции инструментальных средств подготовки и отладки управляющих программ на языке высокого уровня. По ключевым функциям определен набор необходимых визуальных компонентов.

Сравнительный анализ показал, что большинство языков программирования имеют схожие возможности, зачастую различия касаются только полноты используемых функций. Таким образом, можно выделить набор свойств, которым должен обладать обобщенный язык программирования. Управляющая программа на языке высокого уровня имеет определенную структуру, которая представлена в работе в виде формального грамматического описания в расширенной форме Бэкуса — Наура (РБНФ), фрагмент которой в графическом виде представлен на рисунке 1.

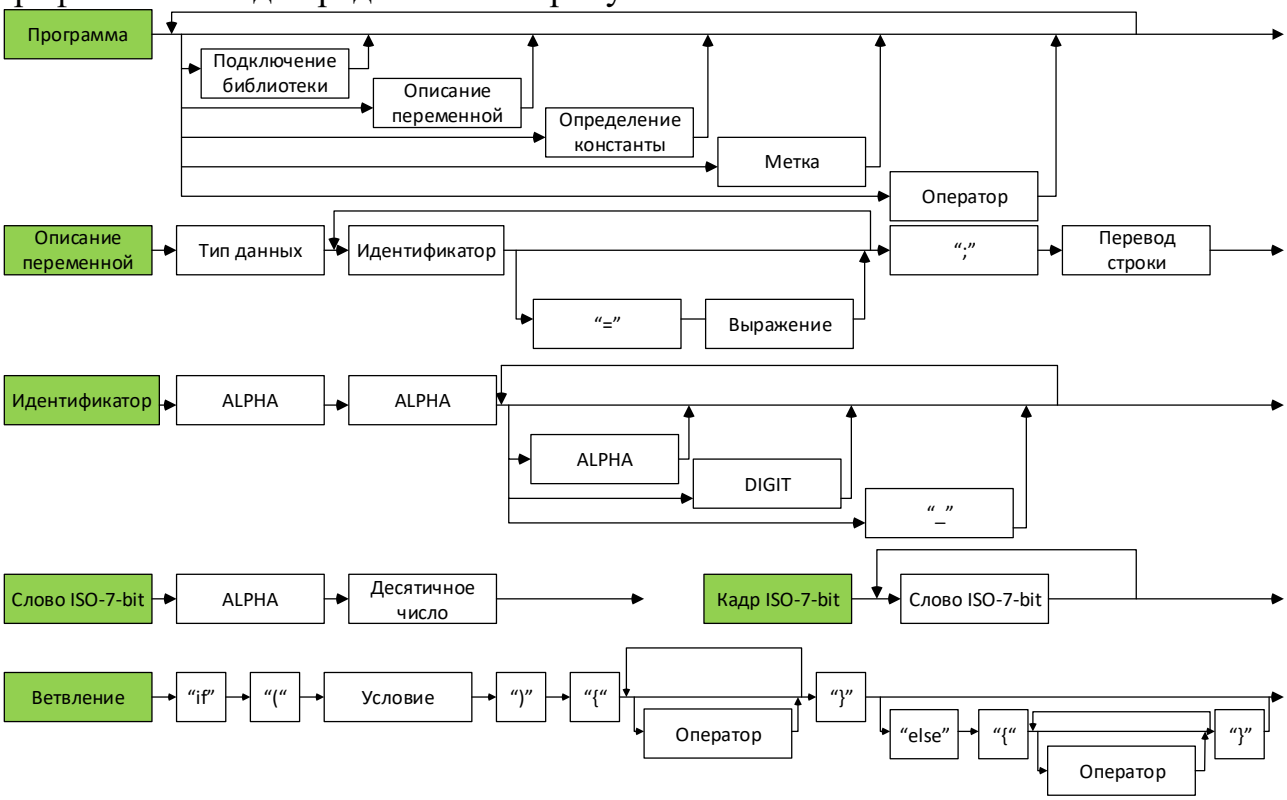


Рисунок 1 - Фрагмент диаграммы минимально необходимого набора синтаксических элементов

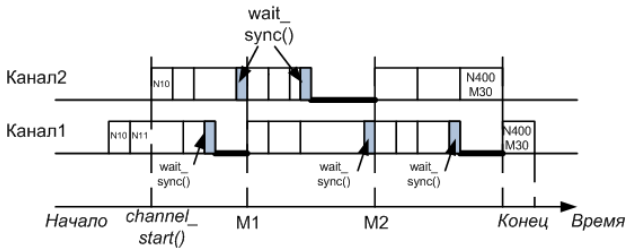
Программа состоит из набора функций, одна из которых является главной функцией. Выполнение программы начинается вызовом главной функции.

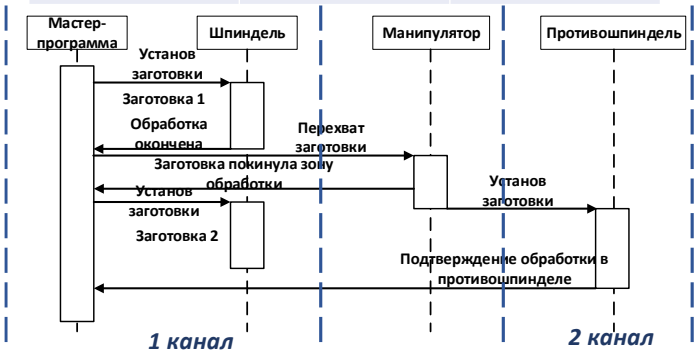
Каждая функция имеет блок выполняемых операторов. Блок операторов – это последовательность выражений и сложных операторов. С точки зрения процесса выполнения программа представляет собой рекурсивную интерпретацию блоков операторов и выражений.

Для персональных компьютеров существует набор специализированного программного обеспечения, которое позволяет отлаживать программы, следя за их выполнением изнутри. В силу специфики управляющих программ (применение, наряду с алгоритмическими конструкциями, специфичных для систем ЧПУ элементов: кода ISO-7bit, таблиц параметров инструмента, коррекции ШВП и других) невозможно просто взять данный инструментарий и применить его для систем ЧПУ. Необходимо разработать подход к созданию подобного инструментария.

Далее расширены функциональные возможности языка высокого уровня и специфицирован дополнительный набор команд для реализации многоканального программирования (рисунок 2).

Функции многоканального программирования		
Управление ошибками	**Управление каналами**	**Синхронизация каналов**
terminate()	**channel_load()** **channel_run()** **channel_start()** **channel_stop()** **channel_reset()**	**channel_wait()** **sleep()** **get_sync()** **release_sync()** **pulse_sync()** **wait_sync()**





Канал 1:
PROG1:
...
N10 channel_load(2,"PROG2")
N20 channel_start(2)
...
N80 wait_sync(1,1,2)
...
N120 pulse_sync(1)
N180 wait_sync(2,1,2)
...
N140 pulse_sync(2)
...
N200 channel_wait(2)
...
N250 M30

Канал 2:
PROG2:
...
N70 wait_sync(1,1,2)
...
N130 pulse_sync(1)
...
N270 wait_sync(2,1,2)
...
N350 pulse_sync(2)
...
N400 M30

Рисунок 2 - Расширение функциональных возможностей языка высокого уровня добавлением функций многоканального программирования

Поддержка системой ЧПУ многоканальной обработки позволяет решать задачи, связанные с оптимизацией технологического процесса обработки детали на одном отдельно взятом многокоординатном обрабатывающем центре, а также управления автоматизированными линиями и устройствами (манипуляторами) по перемещению заготовок.

Для реализации функции многоканальной обработки необходимо иметь возможность программного управления работой каналов непосредственно из управляющей программы.

В современных языках высокого уровня применяются те же элементы, что и в процедурных языках программирования, следовательно, для отладки

управляющих программ, написанных для оборудования с ЧПУ, можно использовать схожие технологии, которые используются в современных системах программирования, такие как: точка останова, точка трассировки, просмотр значений переменных в процессе выполнения программы, просмотр уровней стека вызовов, трассировка, условный и безусловный останов управляющей программы.

Далее, на базе систематизированных функций инструментария отладки, определяется набор необходимых для реализации компонентов (рисунок 3).

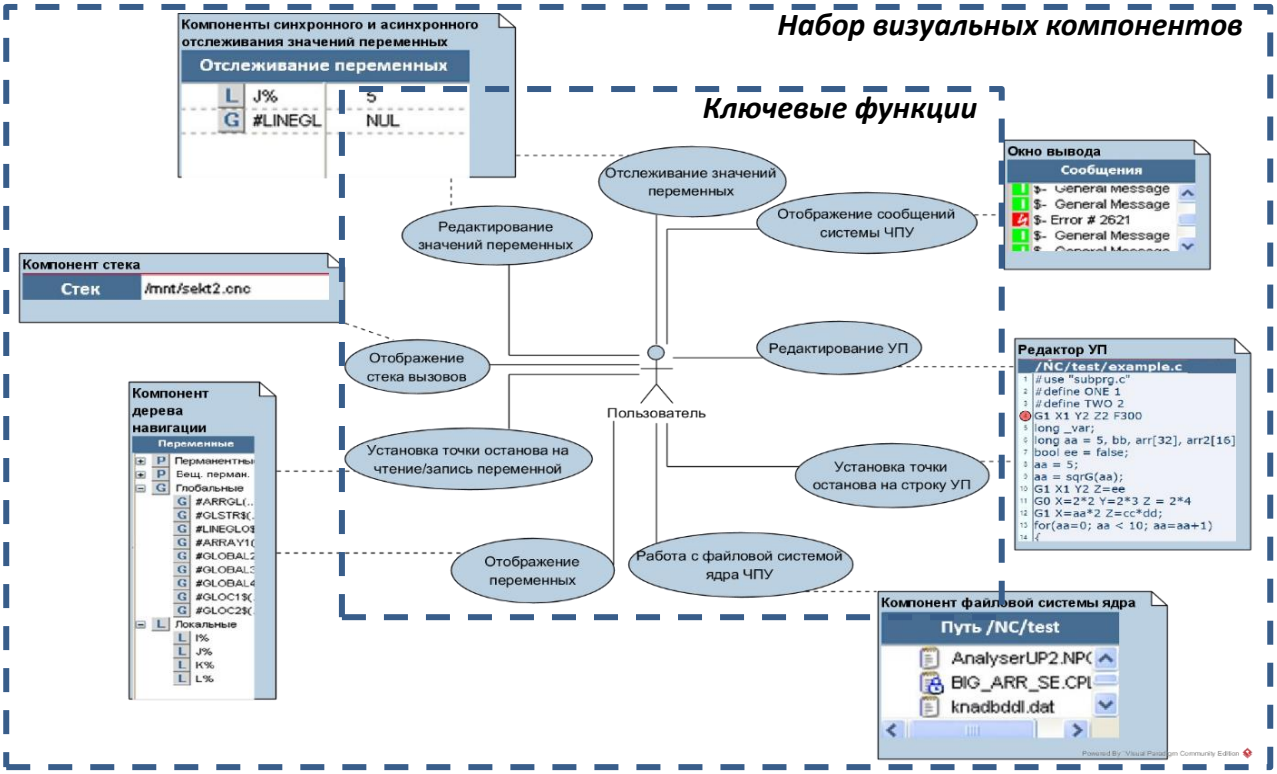


Рисунок 3 - Формирование набора визуальных компонентов интерфейса оператора

Приведены ключевые функции (рисунок 3), необходимые инструментарию разработки и отладки УП на языке высокого уровня: отображение, редактирование и отслеживание значений переменных, отображение стека вызова переменных, возможности редактирования управляющих программ, установка точек останова на чтение/запись переменной и на строку УП, работа с файловой системой ядра ЧПУ, получение и отображение сообщений от системы ЧПУ. В соответствии с этим набором функций определяется набор разрабатываемых визуальных компонентов (редактор управляющих программ, экраны дерева переменных, отслеживания переменных, стека вызовов, сообщений, списка файлов). Используется модульный подход для расширения функциональности системы в дальнейшем.

В третьей главе разработаны структурная схема, архитектурные модели инструментария для разработки и отладки управляющих программ на языке высокого уровня, осуществляется выделение модулей, работающих в составе ядра и терминала (рисунок 4).

На базе структурной схемы строятся архитектурные модели инструментария для разработки и отладки управляющих программ на языке высокого уровня.

По своему назначению модули могут работать на стороне ядра системы ЧПУ или на стороне терминала.

Архитектурная модель инструментария подготовки и отладки управляющих программ на языке высокого уровня представлена на рисунке 5.

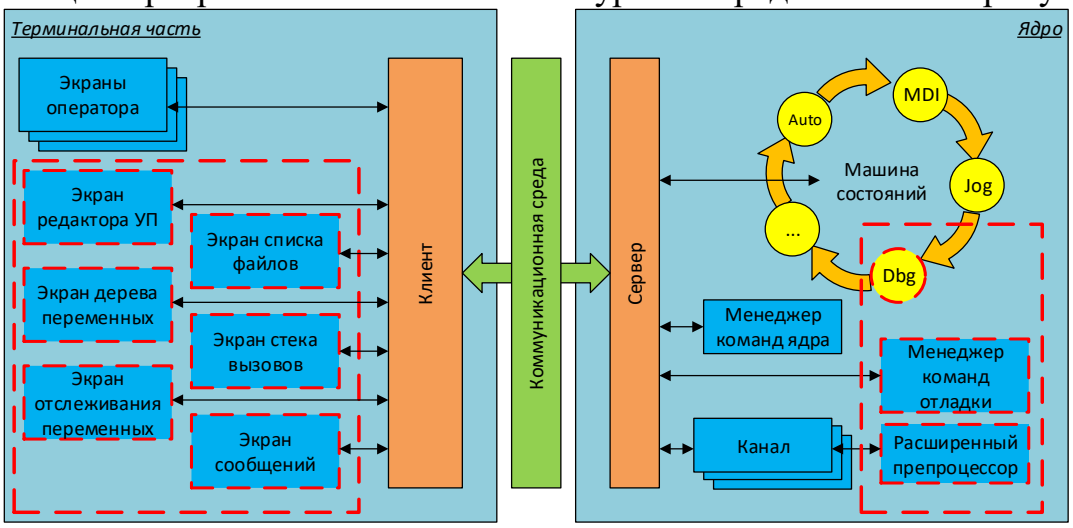


Рисунок 4 - Структурная схема инструментария подготовки и отладки параметрических управляющих программ

Рисунок 5 - Архитектурная модель инструментария подготовки и отладки параметрических управляющих программ

В терминальной части системы ЧПУ разработаны следующие компоненты: модуль подсветки синтаксиса языка высокого уровня в редакторе управляющих программ, модуль поддержки работы с точками останова, модуль визуализации и изменения текущих значений, набора переменных и состояния стека переменных в процессе отладки, модуль управления файлами.

На уровне ядра системы ЧПУ были разработаны такие модули, как: модуль реализации специального режима системы ЧПУ для отладки управляющей программы, модуль для поддержки точек останова ядра системы ЧПУ - условных и безусловных, модуль для поддержки уровней стека вызовов ядра системы ЧПУ, модуль для поддержки просмотра значений переменных в процессе выполнения ядра системы ЧПУ.

В современных системах ЧПУ для реализации специфичных технологий обработки пишут специализированные циклы, называемые станочными или пользовательскими. В системах ЧПУ, имеющих развитый язык программирования высокого уровня, такие технологические циклы реализуются в виде параметрических подпрограмм, которые принимают входные параметры для расчета перемещений при технологических операциях в виде параметров подпрограммы. Основной проблемой, возникающей при создании управляющей программы программистом-технологом, является наличие большого количества входных параметров, тип и расположение которых необходимо изучить и задавать при вызове подпрограммы. Для решения подобной проблемы был разработан механизм создания экранов на базе конфигурируемых масок с передачей параметров функциям, написанным на языке высокого уровня. Набор параметров, их типы, ограничения, описания и подсказки сохраняются в привязанном к групповой технологии XML-документе, реализованном на базе XSD-схемы (рисунок 6).

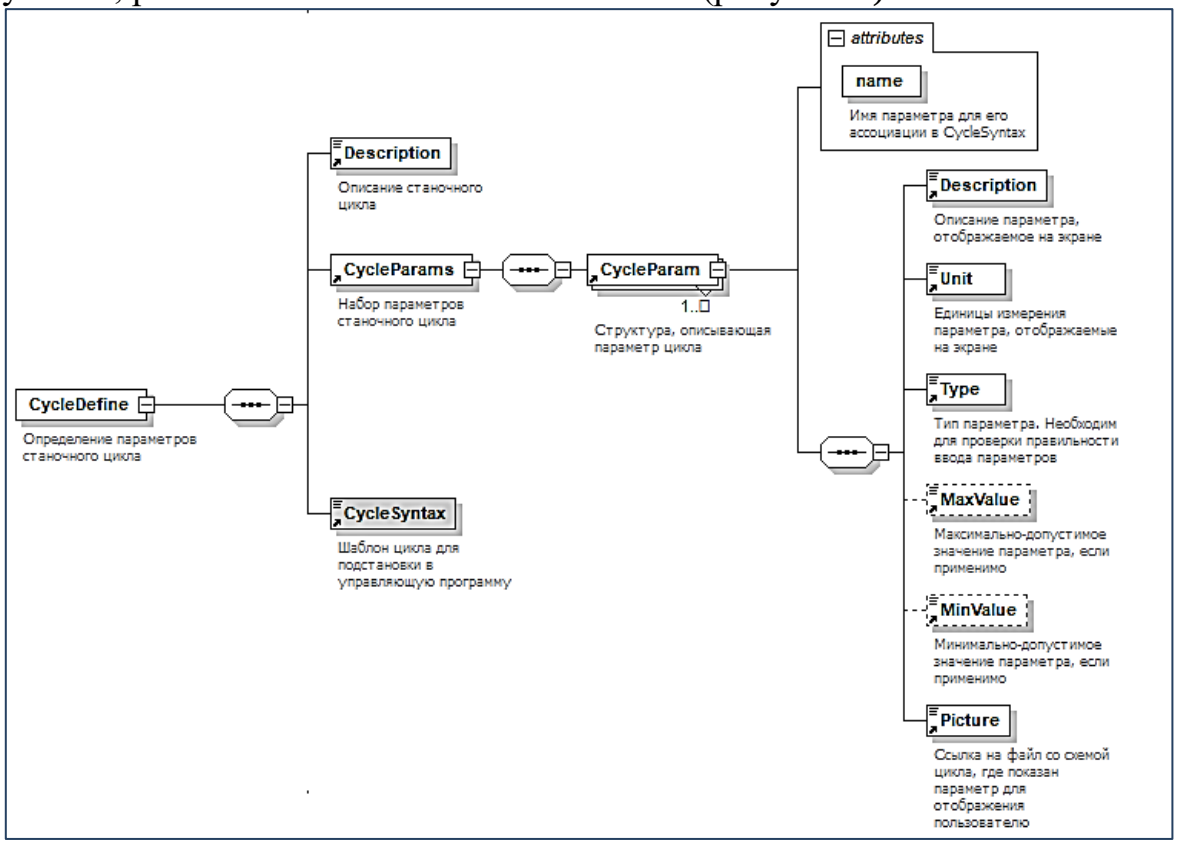


Рисунок 6 – XSD-схема параметров механизма создания экранов на базе конфигурируемых масок

При вызове пользователем соответствующего цикла появляется диалоговое окно для ввода параметров. Для каждого параметры может быть

предусмотрено описание и проверка корректности введенных значений. После завершения ввода параметров формируется строка в УП.

Предложена методика создания параметрических подпрограмм, станочных и измерительных циклов и групповой технологии с использованием инструментария (рисунок 7).

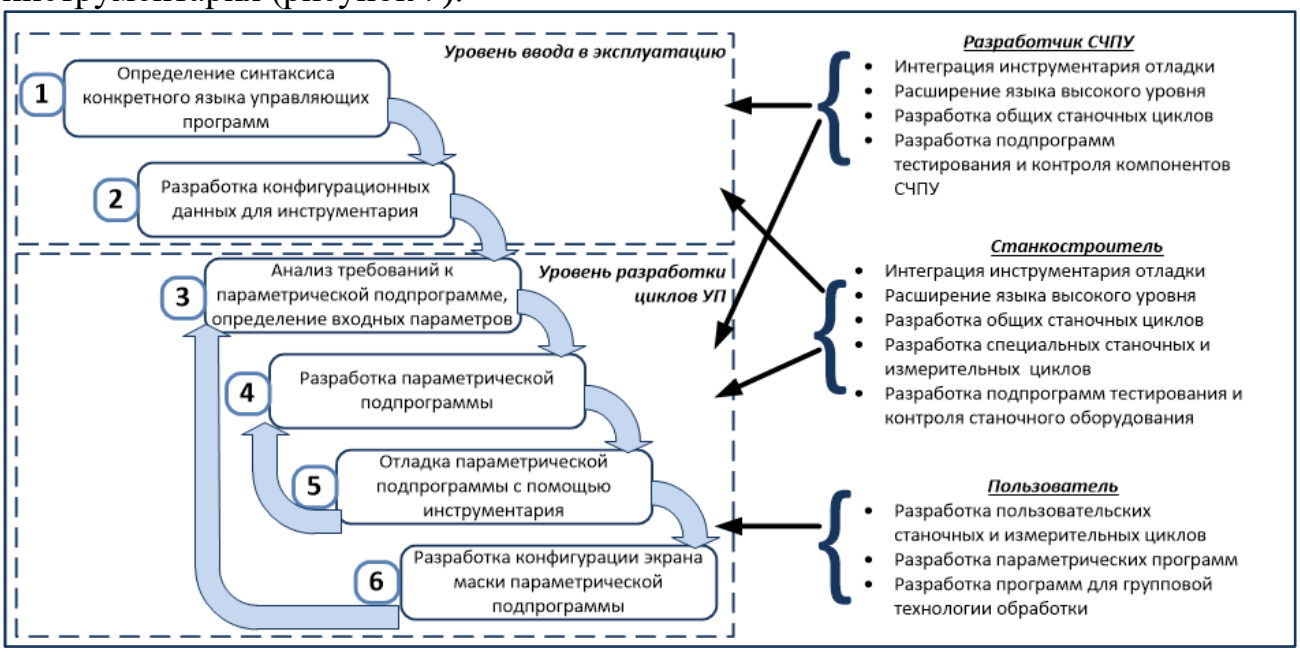


Рисунок 7 – Методика создания параметрических подпрограмм, станочных и измерительных циклов и групповой технологии с использованием инструментария

На первом шаге выполняется анализ синтаксиса языка управляющих программ системы ЧПУ. На втором шаге формируются конфигурационные данные для интеграции инструментария с синтаксисом языка управляющих программ. Первые два шага производятся один раз при привязке инструментария к системе ЧПУ. На третьем шаге производится анализ параметрической подпрограммы, которую необходимо реализовать, выделяется набор входных параметров. На четвертом шаге производится разработка параметрической подпрограммы. На пятом шаге выполняется проверка и отладка подпрограмма при помощи инструментария, в случае необходимости производится возврат к четвертому шагу. На шестом шаге, в случае необходимости, разрабатывается конфигурация экрана маски параметрической подпрограммы.

Процесс выполняется итерационно для каждой разрабатываемой подпрограммы.

В четвертой главе приведены варианты практического применения разработанных моделей, модулей, компонентов и алгоритмов на примерах решения задач управления с применением разработанной методики: реализация функций многоканальной обработки, разработка УП для проведения испытаний оборудования, разработка конфигурируемых экранов масок для применения в обработке групповых деталей и станочных циклов, решения задачи зубофрезерования с применением настраиваемой синхронизации движения осей, когда коэффициенты синхронизации задаются в управляющей программе,

а режим синхронизации включается или выключается при помощи специальной команды в управляющей программе, передача параметров непосредственно из УП на привода и устройства электроавтоматики.

Также управление запуском и взаимодействием между каналами, возможно применять на уровне разработчика системы ЧПУ для проведения автоматизированных тестов функциональности системы ЧПУ.

Следующей задачей, решаемой с помощью разработанного инструментария, является разработка управляющих программ для проведения испытаний оборудования. Были разработаны алгоритм и соответствующая управляющая программа, автоматизирующие эти процедуры измерения точности и повторяемости позиционирования исполнительных органов станка согласно ГОСТ 27843-2006. Автоматизировано измерение отклонения круговых траекторий (двунаправленного кругового отклонения G(b), среднего радиального отклонения D и радиальных отклонений F), согласно ГОСТ ISO 230-4-2015, регламентирующего программирование станка на движение по двум круговым траекториям (по часовой и против часовой стрелки).

Были разработаны ряд станочных технологических циклов. При обработке различных деталей на станках с ЧПУ встречаются повторяющиеся элементы обработки, такие как карманы, цапфы, отверстия, канавки и т.п. Использование циклов дает следующие преимущества:

- сокращается размер управляющей программы. Это достигается за счет переноса части кода УП в подпрограмму цикла, в основной УП остается только вызов цикла;
- упрощается разработка управляющей программы. Программисту не нужно продумывать логику выполнения цикла – использование ускоренных перемещений, отводов/подводов инструмента, смены значений подачи при врезании и обработке, смены систем координат и т.п.

В системе ЧПУ может быть реализовано большое количество технологических циклов. Несмотря на их разнообразие в функциональном плане интерфейс для ввода данных в цикле будет иметь аналогичный вид. Чтобы не создавать множество схожих диалоговых окон предложен следующий подход: создается одна общая xsd-схема, описывающая структуру окна. В зависимости от типа вызванного цикла в xml-описание диалогового окна будут подставлены параметры, характерные для конкретного цикла (рисунок 8).

Применение языка высокого уровня с набором специальных функций для управления исполнением программ на разных каналах позволяет достичь прироста производительности в процессе обработки деталей на станках, обрабатывающих центрах и автоматических линиях.

Наличие в языке высокого уровня математических операторов и возможность системы ЧПУ интерпретировать их позволило задавать перемещение инструмента по сложным траекториям или по траекториям, связанным сложными интерполяционными зависимостями. На примере решения задачи зубофрезерования продемонстрировано применение настраиваемой синхронизации движения осей, когда коэффициенты

синхронизации задаются в управляющей программе, а режим синхронизации включается или выключается при помощи специальной команды в управляющей программе. Реализация задачи синхронизации осей потребовала расширение функциональных возможностей интерполятора путем добавления специального режима работы, при котором команды управления осями поступают на блок синхронизации, содержащий коэффициенты связи между осями.

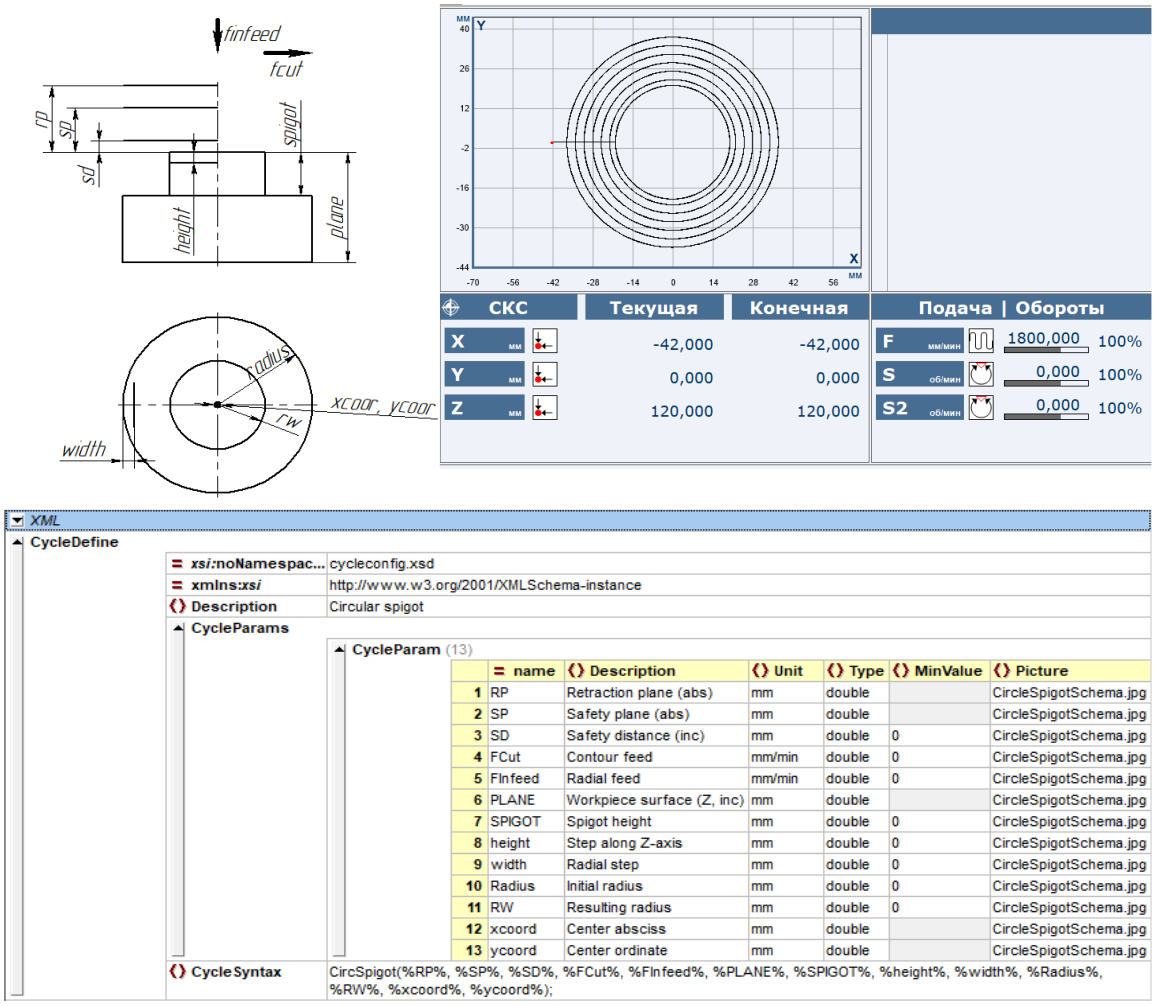


Рисунок 8 - Разработка станочного цикла фрезерования круговой цапфы

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Выполнена научно-квалификационная работа, в которой содержится решение актуальной задачи, связанной с сокращением сроков разработки управляющих программ, параметрических подпрограмм, станочных и измерительных циклов, а также групповой технологии путем разработки моделей и инструментальных средств для подготовки и отладки управляющих программ на языке высокого уровня.

2. В процессе работы установлены взаимосвязи между характеристиками языков высокого уровня для персональных компьютеров и языка высокого уровня управляющих программ систем числового программного управления,

позволяющие определить необходимый состав и количество модулей для создания инструментария редактирования и отладки управляющих программ.

3. На основе установленных взаимосвязей построена структурная схема и разработана архитектурная модель инструментария подготовки и отладки управляющих программ на языке высокого уровня, отличающаяся тем, что их конфигурирование производится в зависимости от синтаксиса используемого языка.

4. Разработана обобщенная модель языка высокого уровня на базе расширенной формы Бэкуса-Наура, отличающаяся тем, что включает в себя минимально необходимый набор синтаксических элементов для реализации алгоритмических и специализированных конструкций, охватывающих широкий спектр возможностей языков управляющих программ различных систем ЧПУ и компьютерных языков высокого уровня.

5. На базе архитектурной модели инструментария и обобщенной модели языка высокого уровня разработан инструментарий подготовки и отладки управляющих программ на языке высокого уровня.

6. Предложена методика создания параметрических подпрограмм, станочных и измерительных циклов и групповой технологии с использованием инструментария.

7. Эффективность разработанных инструментов для редактирования и отладки управляющих программ подтверждена внедрением результатов диссертации в рамках НИОКР ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» совместно со станкостроительным предприятием ООО «ВСЗ «Техника».

8. Полученные результаты рекомендованы к применению на предприятиях машиностроительного профиля, разрабатывающих металлообрабатывающие станки и комплексы с ЧПУ, а также в учебном процессе при подготовке инженерных кадров по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств».

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Пушков, Р.Л. Практические аспекты построения многотерминального человеко-машинного интерфейса на примере системы ЧПУ "АксиОМА Контрол" / Пушков Р.Л., Евстафиева С.В., Соколов С.В., Абдуллаев Р.А., Никишечкин П.А., Кулиев А.У., Сорокоумов А.Е. // Автоматизация в промышленности. - 2013. - №5. - С.37-41.

2. Нежметдинов, Р.А. Построение специализированной системы ЧПУ для многокоординатных токарно-фрезерных обрабатывающих центров / Нежметдинов Р.А., Пушков Р.Л., Евстафиева С.В., Мартинова Л.И. // Автоматизация в промышленности. - 2014. - №6. - С.25-28.

3. Евстафиева, С.В. Разработка аппаратных компонентов системы ЧПУ с использованием современных САПР / Евстафиева С.В., Лукьянов А.В.,

Мартинова Л.И., Пушков Р.Л. // Автоматизация в промышленности. - 2014. - №9. - С.35-39.

4. Нежметдинов, Р.А. Числовое программное управление фрезерными обрабатывающими центрами с использованием высокоскоростных протоколов связи / Нежметдинов Р.А., Пушков Р.Л., Любимов А.Б., Мартинова Л.И., Евстафиева С.В. // Автоматизация в промышленности. - 2015. - №5. - С.24-26.

5. Козак, Н.В. Реализация задач управления электроавтоматикой на основе внешних вычислительных модулей Soft PLC в системе ЧПУ "АксиОМА Контрол" / Н.В. Козак, Р.Л. Пушков, С.В. Евстафиева // Промышленные АСУ и контроллеры. - 2016. - №7. - С.3-9.

6. Нежметдинов, Р.А. Практические аспекты применения программно-реализованного контроллера для управления электроавтоматикой вертикально-фрезерных станков Quaser MV184 / Нежметдинов Р.А., Никишечкин П.А., Пушков Р.Л., Евстафиева С.В.// Автоматизация в промышленности. - 2016. - №5. - С.14-17.

7. Пушков, Р.Л. Практические аспекты применения языка высокого уровня в системе ЧПУ для реализации групповой обработки / Пушков Р.Л., Саламатин Е.В., Евстафиева С.В.// Автоматизация в промышленности. - 2018. - №5. - С.31-34.

8. Никишечкин, П.А. Теоретические аспекты разработки программного комплекса для автоматизированной установки операционной системы реального времени "AxiOMA RTOS" / Никишечкин А.П., Пушков Р.Л., Никич А.Н.// Вестник МГТУ "Станкин". - 2016. - №3. - С.78-81.

9. Нежметдинов, Р.А. Управление автоматической сменой инструмента на многоцелевых обрабатывающих центрах с применением унифицированных программных решений / Р.А. Нежметдинов, П.А. Никишечкин, Р.Л. Пушков // Промышленные АСУ и контроллеры. - 2016. - №6. - С.19-24.

10. Мартинов, Г.М. Принципы построения распределенной системы ЧПУ технологическими машинами с использованием открытой модульной архитектуры / Мартинов Г.М., Мартинова Л.И., Козак Н.В., Нежметдинов Р.А., Пушков Р.Л.// Справочник. Инженерный журнал. - 2011. - №12. - С.44-50.

11. Мартинов, Г.М. Прикладные решения в области управления электроавтоматикой станков с ЧПУ класса PCNC / Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А., Козак Н.В., Пушков Р.Л.// Промышленные АСУ и контроллеры. - 2011. - №4. - С.48-53.

12. Мартинов, Г.М Принцип построения распределенной системы ЧПУ с открытой модульной архитектурой / Мартинов Г.М., Козак Н.В., Нежметдинов Р.А., Пушков Р.Л.// Вестник МГТУ "Станкин". - 2010. №4(12). - С.116-122.

13.Мартинов, Г.М. Принцип построения универсального интерпретатора языка программирования высокого уровня для систем ЧПУ / Мартинов Г.М., Обухов А.И., Пушков Р.Л.// Мехатроника, автоматизация, управление. - 2010. - №6. - С.42-50.

14.Мартинов, Г.М. Построение инструментария отладки управляющих программ систем ЧПУ на языках высокого уровня / Мартинов Г.М., Пушков Р.Л.// Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2008. - №11. - С. 19-24.

15. Мартинова, Л.И. Практические аспекты применения отечественной многофункциональной системы ЧПУ ""АксиОМА Контрол" / Мартинова Л.И.,

Козак Н.В., Нежметдинов Р.А., Пушков Р.Л., Обухов А.И.// Автоматизация в промышленности. - 2012. - №5. - С.36-40.

16. Мартинова, Л.И. Решение задач синхронизации и точного позиционирования осей в системе ЧПУ / Мартинова Л.И., Пушков Р.Л., Козак Н.В., Трофимов Е.С.// Автоматизация в промышленности. - 2011. - №5. - С.30-35.

17. Мартинова, Л.И. Реализация открытости управления электроавтоматикой станков в системе ЧПУ класса PCNC / Мартинова Л.И., Козак Н.В., Нежметдинов Р.А., Пушков Р.Л.// Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2011. - №2. - С.11-16.

Статьи, опубликованные изданиях WebOfScience и Scopus:

18. Martinova, L.I. The Russian multi-functional CNC system AxiOMA control: Practical aspects of application / L.I. Martinova, N.V. Kozak, R.A. Nezhmetdinov, R.L. Pushkov, A.I. Obukhov // Automation and Remote Control. - 2015. - Volume 76, Issue 1. - pp.179-186.

19. Martinova, L.I. Solution to the problems of axle synchronization and exact positioning in a numerical control system / L.I. Martinova, R.L. Pushkov, N.V. Kozak, E.S. Trofimov // Automation and Remote Control. - 2014. - Volume 75, Issue 1. - pp.129-138

Другие публикации автора:

20. Пушков, Р.Л. Применение языка высокого уровня СЧПУ "АксиОМА Контрол" для реализации цикла групповой обработки / Р.Л. Пушков, С.В. Саламатин, С.В. Евстафиева // Труды XVII-ой международной научно-практической конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2017). Под общ. ред. А.В. Толока. Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова. Электрон. текстовые дан. М.: ИПУ РАН. - 2017. -С.94-98

21. Пушков, Р.Л. Практические аспекты реализации управления уровнями пользовательского доступа в системе ЧПУ "Аксиома Контрол" / Р.Л. Пушков, С.В. Евстафиева, С.В. Рыбников // Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. Оренбург: ООО ИПК "Университет". - 2014. - С.85-89

22. Пушков, Р.Л. Применение специализированного набора функций для управления многоканальной обработкой / Пушков Р.Л. // Материалы международной научно-практической конференции "МАШИНОСТРОЕНИЕ: ИННОВАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ". Санкт-Петербург: СПбФ НИЦ МС. - 2018. – №1. – С.46-49.

23. Пушков, Р.Л. Практические аспекты реализации независимости ядра системы управления от элементной базы ее отдельных узлов / Пушков Р.Л. // Материалы международной научно-практической конференции. Новокузнецк: НИЦ МС. 2018. – №2. – С.123-127.

24. Пушков, Р.Л. Программно-аппаратный модуль вывода информации о состоянии ядра системы ЧПУ / Пушков Р.Л., Бабин М.С. // Труды 15-й

международной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2015). Под ред. А.В. Толока. М.: ООО "Аналитик". - 2015. - С.148-150.

25. Пушков, Р.Л. Средства диагностики SoftPLC контроллера / Пушков Р.Л., Абдуллаев Р.А., Николушкин А.Ю., Червоннова Н.Ю. // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции "Компьютерная интеграция производства и ИПИ - технологии". - 2013. - С.76-81.

26. Пушков, Р.Л. Компенсация погрешностей перемещений в современных системах ЧПУ / Р.Л. Пушков, С.В. Евстафиева, И.А. Ковалев // Тезисы 12-й Международной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2012). - 2012. - С.66.

27. Мартинов, Г. М. Синхронизация осей в системе ЧПУ для зубофрезерования / Мартинов Г. М., Пушков Р. Л., Евстафиева С. В. // Материалы Всероссийской молодежной конференции "АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ (АИТ-2011). -2011. - т.3. - С.56-64.

28. Пушков, Р.Л. Использование диагностической системы для оптимизации процесса правки шлифовального круга / Пушков Р.Л., Сероухов П.Ю. // Материалы Всероссийской молодежной конференции "Инновационные технологии в машиностроении" (ИТМ - 2011). - 2011. - С.289-292.

29. Мартинова, Л.И. Специфика управления мехатронными модулями станков по протоколу PROFIBUS / Мартинова Л.И., Пушков Р.Л., Сорокоумов А.Е. // Материалы IV Всероссийской мультиконференции по проблемам управления (МКПУ - 2011). - 2011. - С.343-345.

30. Пушков, Р.Л. Разработка средств визуализации и контроля движения режущего инструмента для станков с ЧПУ / Пушков Р.Л., Никишечкин П.А. // Тезисы XI Международной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2011)". - 2011. - С.47.

31. Сероухов, П.Ю. Применение системы диагностики в процессе правки шлифовального круга / Сероухов П.Ю., Пушков Р.Л. // Тезисы XI Международной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2011)". - 2011. - С.77.

32. Пушков, Р.Л. Визуализация движения SERCOS-приводов / Пушков Р.Л., Бондаренко А.И. // Труды III Международной научно-технической конференции "Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения" (ТМ-2011). - 2011. - С.315-317.

33. Евстафиева, С.В. Синхронизация осей в системе ЧПУ для зубофрезерования / Евстафиева С.В., Мартинов Г.М., Пушков Р.Л. // Материалы III Научно-образовательной конференции "МАШИНОСТРОЕНИЕ – ТРАДИЦИИ И ИННОВАЦИИ" (МТИ-2010). - 2010. - С.67-74

34. Пушков, Р.Л. Применение препроцессора языка высокого уровня систем ЧПУ для обработки сложных контуров / Пушков Р.Л., Обухов А.И. // Материалы X Международной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2010)". - 2010. - С.213-216.

35. Мартинов, Г.М. Основы построения однокомпьютерной системы ЧПУ с программно реализованным ядром и открытой модульной архитектурой / Мартинов Г.М., Пушков Р.Л., Евстафиева С.В. // Вестник МГТУ "Станкин". - 2008. - №4. - С.82–93.

36. Киселев, С.А. Прогнозирование стойкости инструмента при чистовой обработке / Киселев С.А., Григорьев А.С., Геранюшкин А.В., Пушков Р.Л. // Вестник МГТУ "Станкин". - 2008. - №4. - С.23–32.

Объекты интеллектуальной собственности автора:

37. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017661840 «Программный компонент для визуализации сообщений ядра системы ЧПУ» от 25.08.2017 (Мартинова Л.И., Евстафиева С.В., Пушков Р.Л.)

38. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015611843 «Программный модуль разграничения прав доступа пользователей системы ЧПУ» от 06.02.2015 (Пушков Р.Л., Мартинова Л.И., Евстафиева С.В.)

39. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013613022 «Программный модуль, эмулирующий работу контроллера привода, работающий по протоколу Memobus» от 21.03.2013. (Пушков Р.Л., Козак Н.В., Соколов С.В.)

40. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011610552 «Мультиплатформенный интерпретатор языка программирования высокого уровня для систем ЧПУ» от 11.01.2011. (Мартинов Г.М., Пушков Р.Л., Обухов А.И.)

41. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614074 «Универсальный редактор управляющих программ для систем числового программного управления» от 23.06.2010. (Мартинов Г.М., Мартинова Л.И., Нежметдинов Р.А., Григорьев А.С., Пушков Р.Л.)

Учебные пособия автора:

42. Мартинов Г.М., Мартинова Л.И., Пушков Р.Л. Автоматизация технологических процессов в машиностроении. Учебное пособие - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: МГТУ "Станкин", 2011. - 200 с. (гриф УМО АМ)

43. Емельянова Е.А., Григорьев А.С., Пушков Р.Л., Мартинова Л.И. Программирование систем ЧПУ "HEIDENHAIN". Учебное пособие. – М.: МГТУ "Станкин", 2010. – 87с. (гриф УМО АМ)