

На правах рукописи



Фокин Николай Николаевич

**МОДЕЛЬ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ
ИНСТРУМЕНТАРИЯ РАЗРАБОТКИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ
ДЛЯ ТОКАРНЫХ, ТОКАРНО-ФРЕЗЕРНЫХ И
ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ**

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

Научный руководитель: **Мартинова Лилия Ивановна**
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры компьютерных систем управления
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

Официальные оппоненты: **Бахтадзе Наталья Николаевна**
доктор технических, профессор, заведующий
лабораторией идентификации систем
управления ФГБУН Институт проблем
управления им. В.А. Трапезникова Российской
академии наук, г. Москва,

Холопов Владимир Анатольевич
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой промышленной
информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА –
Российский технологический университет»,
г. Москва.

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

Защита состоится «26» декабря 2023 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.332.02 при ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127994, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.332.02
д.ф.-м.н., доцент



Елисеева Юлия Витальевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Проблема переносимости и редактирования управляющих программ (УП) на системах числового программного управления (ЧПУ) от разных производителей обусловлена отличающимся синтаксисом языков высокого уровня систем ЧПУ, а также дифференциацией способов подготовки УП в процессе внедрения новой продукции в производство.

В рамках внедрения информационных технологий в проектно-производственную деятельность в целях повышения конкурентоспособности современные предприятия обновляют техническую базу и внедряют оборудование с ЧПУ. При этом обновление технологического оборудования происходит по двум направлениям: первое – переоснащение существующих станков современными системами управления, второе – закупка нового оборудования. В обоих случаях использование оборудования с ЧПУ диктует более высокие требования к информационно-технологической-инфраструктуре предприятия, поскольку возникает возможность и необходимость реализации единого информационного пространства (ЕИП) и комплексной автоматизации производственных процессов.

Как правило, программное обеспечение, используемое для автоматизации производственных процессов – это CAD/CAM-системы, в которых возможна не только разработка УП для изготовления деталей на станках определенной группы, но и визуальное моделирование процесса механической обработки. Одним из недостатков таких систем является сложность редактирования УП вне графического интерфейса системы.

Таким образом, становится актуальной проблема не просто разработки УП для изготовления деталей на станках определенной группы, но и возможность редактирования УП в интерфейсе оператора системы ЧПУ вне графического интерфейса CAD/CAM -системы.

Степень разработанности исследования. Проблемам разработки систем подготовки УП в области промышленного сектора посвящены труды В.Л. Сосонкина, Г.М. Мартинова, Р.Л. Пушкова, А.А. Калинина, О.В. Епифановой, С.А. Моцакова, С.А. Шамова, В.Д. Распутниса, А.В. Бовкуна, К. Кумара (K. Kumar), А. Аббаса (A. Abbas), С. Омиру (S. Omiru) и др. Работы перечисленных авторов содержат теоретические основы разработки различных видов автоматизации подготовки управляющих программ для

металлообрабатывающих станков с ЧПУ. В трудах вышеперечисленных ученых проведен обширный анализ имеющихся на рынке решений, четко прописаны методы построения и принципы работы систем автоматизации, базирующиеся на стандартных решениях. Описаны тенденции развития в данной области. Также исследованы основные принципы построения систем автоматизации разработки УП. Однако, инструментарий процесса автоматизации подготовки не рассматривает кроссплатформенные решения в программной части, позволяющие понизить стоимость решений за счет использования менее производительной аппаратной части для решения конкретной технологической задачи.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования и Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания (проект FSFS-2023-0004).

Цель работы. Сокращение времени подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ за счет применения разработанного специализированного инструментария в условиях единичного и мелкосерийного производства.

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

1. Проанализировать существующие способы подготовки управляющих программ для токарных, токарно-фрезерных и фрезерных станков с ЧПУ.
2. Разработать архитектурную модель специализированного инструментария и алгоритмы построения управляющих программ.
3. Разработать методику подготовки управляющих программ с использованием специализированного инструментария.
4. На базе предложенной методики разработать набор макропрограмм типовых технологических переходов механической обработки для токарных, токарно-фрезерных и фрезерных станков с различными системами ЧПУ.
5. Апробировать специализированный инструментарий, применив его на разных системах ЧПУ.

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

1. Установлены логические взаимосвязи между переменными, определяющими геометрию обрабатываемых элементов, и переменными, определяющими стратегию обработки, заложенную в станочных циклах и командах логического управления.

2. На базе установленных взаимосвязей разработана архитектурная модель специализированного инструментария, специфика которой заключается в многоуровневом взаимодействии программных модулей с галереей макропрограмм для поддерживаемых систем ЧПУ, выделении универсальных шаблонов разработки макропрограмм на языке высокого уровня и расширении набора поддерживаемых систем ЧПУ и операционных систем.

3. Разработана методика подготовки управляющих программ с использованием разработанного специализированного инструментария, особенностью которой является набор правил структурирования и расположения макропрограмм в системе ЧПУ.

4. Разработаны алгоритмы работы токарных и фрезерных циклов, использующих единый набор переменных, единую стратегию выполнения технологического перехода и единые команды логического управления для разных систем ЧПУ.

Теоретическая значимость работы заключается в созданной архитектурной модели специализированного инструментария и алгоритмах построения управляющих программ по единому проекту с единой логикой работы в средах рассматриваемых систем ЧПУ.

Практическая значимость работы заключается в:

- 1) созданном специализированном инструментарии разработки управляющих программ для токарных, токарно-фрезерных и фрезерных станков с системой ЧПУ;
- 2) разработанных наборах макропрограмм типовых технологических переходов механической обработки для токарных, токарно-фрезерных и фрезерных станков с системами ЧПУ Fanuc, Siemens и АксиОМА Контрол.

Объект исследования. АСТПП в части процесса подготовки и редактирования управляющих программ для токарных, токарно-фрезерных и фрезерных станков с разными системами ЧПУ.

Предмет исследования. Специализированный инструментарий подготовки управляющих программ, работа которого основана на методах и логике взаимодействия установочных макропрограмм, циклов механообработки и подпрограмм в разных системах ЧПУ.

Методы исследования. Теоретические исследования в диссертации базируются на основных положениях теории резания, тригонометрии и стереометрии. При решении поставленных задач использовались методы объектно-ориентированного проектирования, концепция объектно-

ориентированного программирования, правила макропрограммирования с использованием языков высокого уровня систем ЧПУ.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) архитектурная модель и алгоритм работы инструментария подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ;
- 2) способ подготовки управляющих программ с использованием инструментария в диалоговом режиме, отличающийся от существующих унификацией программного кода;
- 3) механизм расширения набора стандартных циклов систем ЧПУ, основанный на внедрении галереи макропрограмм в каждую рассматриваемую систему ЧПУ и реализации набора правил взаимодействия макропрограмм из галереи с использованием локальных и глобальных переменных;
- 4) способ редактирования управляющих программ на разных системах ЧПУ, способствующий сокращению времени по сравнению со стандартными способами за счет изменения определенных значений переменных макропрограмм через интерфейс оператора системы ЧПУ.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласованием теоретических и экспериментально полученных данных, апробацией разработанного инструментария и разработанных автономных встраиваемых решений для каждой рассматриваемой системы ЧПУ.

Апробация работы. Теоретические и практические результаты, полученные автором, докладывались на: заседаниях кафедры «Компьютерные системы управления» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»; XVII Международной научно-практической конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2017). Россия, Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 12-14 декабря 2017 г.; Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования машиностроения 2018». Россия, Севастополь, ФГАО ВО «Севастопольский государственный университет», 10-14 сентября 2018 г.; Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования машиностроения 2019». Россия, Севастополь, ФГАО ВО «Севастопольский государственный университет», 09-13 сентября 2019 г.; Международной научно-технической конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования машиностроения

2021». Россия, Севастополь, ФГАО ВО «Севастопольский государственный университет», 6-10 сентября 2021 г.; Международной научно-практической конференции «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники». Россия, Тюмень, 25.01.2022; Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг». Россия, Сочи, 16-20 мая 2023 г.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует формуле научной специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами в области исследования паспорта специальности в части п.п.:

Пункт 1. Автоматизация производства заготовок, изготовления деталей и сборки.

Пункт 11. Методы создания, эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая базы данных и методы их оптимизации, промышленный интернет вещей, облачные сервисы, удаленную диагностику и мониторинг технологического оборудования, информационное сопровождение жизненного цикла изделия.

Пункт 17. Разработка методов обеспечения совместимости и интеграции АСУ, АСУТП, АСУП, АСТПП и других систем и средств управления.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ (из них 2 в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК, 4 в журналах, индексируемых Web Of Science и Scopus), включая тезисы докладов, опубликованные в рамках международных и региональных научно-технических конференций, создан 1 объект интеллектуальной собственности в виде свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №2021611934 (Портативный диалоговый программный комплекс для разработки и редактирования управляющих программ токарных, токарно-фрезерных и вертикально-фрезерных станков с ЧПУ).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 98 наименований. Работа изложена на 149 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка, 35 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы по сокращению времени подготовки УП для технологического оборудования с разными системами ЧПУ: Fanuc, Siemens и АксиОМА Контрол, сформулированы цели и задачи исследования, раскрыто основное содержание научной новизны и практической значимости выполняемой работы.

В первой главе на основе проведенного анализа способов подготовки УП выявлена необходимость создания специализированного инструментария и определены концептуальные требования, такие как возможность работать в разных системах ЧПУ для редактирования УП и разных операционных системах при разработке УП.

САМ-системы позволяют запрограммировать обработку детали любой сложности для различных системы ЧПУ благодаря использованию постпроцессоров. Главными проблемой использования САМ-систем являются: невозможность редактирования разработанной УП на станке и необходимость в параметризации режущего инструмента в системе ЧПУ в соответствии с используемым в УП, что увеличивает время внедрения деталей в производство. САМ-системы цехового уровня позволяют произвести быстрое редактирование УП с использованием встроенного средства моделирования непосредственно в системе ЧПУ. Основной проблемой является невозможность изменения разработанной УП вне диалоговой системы и переноса УП на другие системы ЧПУ. Макропрограммирование на языках высокого уровня разных систем ЧПУ позволяет создавать пользовательские циклы с использованием необходимого набора переменных. Главным достоинством макропрограммирования является возможность быстрого перевода управляющего кода цикла в синтаксис другой системы ЧПУ, основным недостатком является сложность программирования, требующая высокой квалификации исполнителя.

Таким образом в настоящее время актуальна задача создания специализированного инструментария, способного работать в различных операционных системах и способного интегрироваться в разные системы ЧПУ с использованием наборов макропрограмм. Это позволило сформулировать цель и задачи исследования.

Во второй главе на основе проведенного анализа методов подготовки УП для оборудования с ЧПУ определена концепция специализированного инструментария, позволяющего сократить время подготовки и редактирования УП на разных системах ЧПУ.

Формально концепция специализированного инструментария базируется на 3-х уровневой архитектуре (Рисунок 1). Уровень пользователя и уровень программного обеспечения формируют систему приложения, уровень системы ЧПУ представлен галереей макропрограмм. Система приложения состоит из графических интерфейсов, которые взаимодействуют с программными модулями через специализированную библиотеку, модуля управления файлов и библиотек УП, модуля шаблона УП и каталогом модулей постпроцессирования. Графический интерфейс имеет четко структурированный ввод данных и графическое сопровождение; модуль управления файлов УП и библиотек используется для создания пользовательских директорий хранения вводимой информации в операционных системах; модуль шаблона УП применяется для построения УП как строгой последовательности переходов и для редактирование исходных данных каждого перехода; модули постпроцессирования используются для генерации кода УП под конкретную систему ЧПУ.

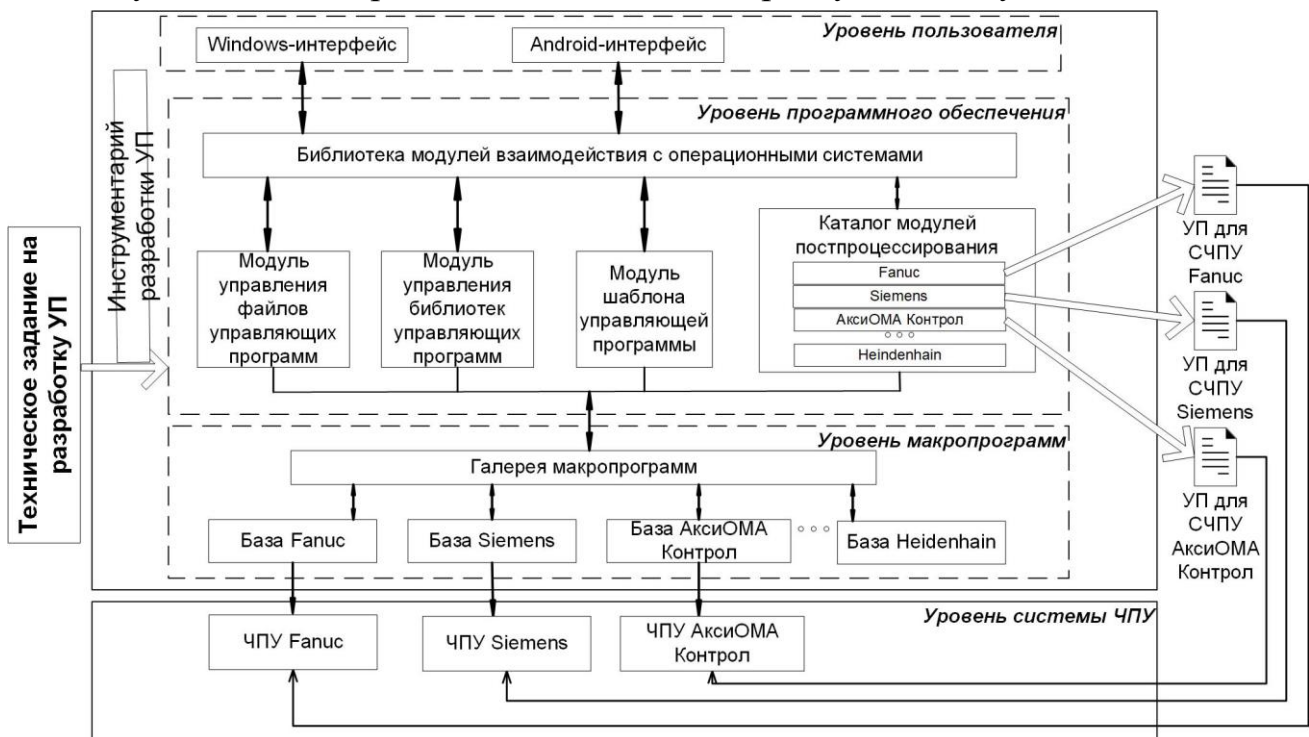


Рисунок 1 – Архитектурная модель инструментария

Алгоритм разработки УП с использованием специализированного инструментария разбит на несколько этапов. На этапе ввода параметров пользователь с использованием графического интерфейса вводит значение переменных циклов. На этапе построения последовательности технологических переходов осуществляется вызов циклов в определенной последовательности, что определяет структуру УП. На этапе формирования УП в обезличенном

формате получается абстрактное представление УП, не привязанное к диалекту языка конкретной системы ЧПУ. Далее, на этапе привязки УП используется каталог модулей постпроцессорирования и осуществляется конвертирование обезличенной УП в формат УП для конкретной системы ЧПУ (Рисунок 2).

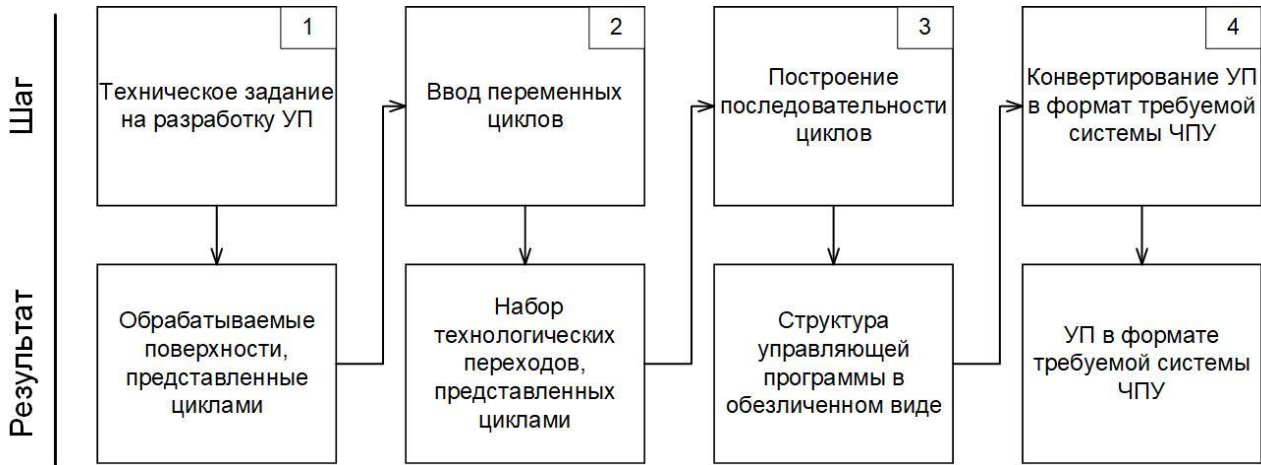


Рисунок 2 – Алгоритм разработки УП с использованием инструментария

Графический интерфейс специализированного инструментария базируется на принципах построения масок ввода геометрических и технологических параметров циклов в пользовательских интерфейсах диалоговых систем ЧПУ. Интерфейс каждого технологического перехода содержит поля ввода данных геометрии и технологических, а также пояснительную графическую информацию для корректного ввода параметров.

Методика расширения применимости и опций специализированного инструментария может включать: дополнение набора поддерживаемых систем ЧПУ другими системами, дополнение набора разработанных циклов новыми циклами, работающих по заранее определенной алгоритмической связи с базовыми циклами, расширение стратегий обработки разработанных циклов, дополнение возможности портирования на другие операционные системы.

В третьей главе представлена разработанная методика программирования с использованием специализированного инструментария, который предусматривает взаимодействия макропрограмм, подготовительных подпрограмм с циклами обработки за счет передачи значений глобальных переменных в конечный цикл обработки, где они взаимодействуют с локальными переменными цикла посредством математических, тригонометрических и логических вычислений (Рисунок 3).

Алгоритм взаимодействия установочных макропрограмм с циклами обработки основан на преобразовании локальных переменных сначала в глобальные с дальнейшим использованием глобальных переменных в

макропрограммах расчёта с последующим вызовом макропрограмм расчета одна из другой. Это позволяет производить обработку элементов различной конфигурации, имеющих одинаковое расположение в плоскости.

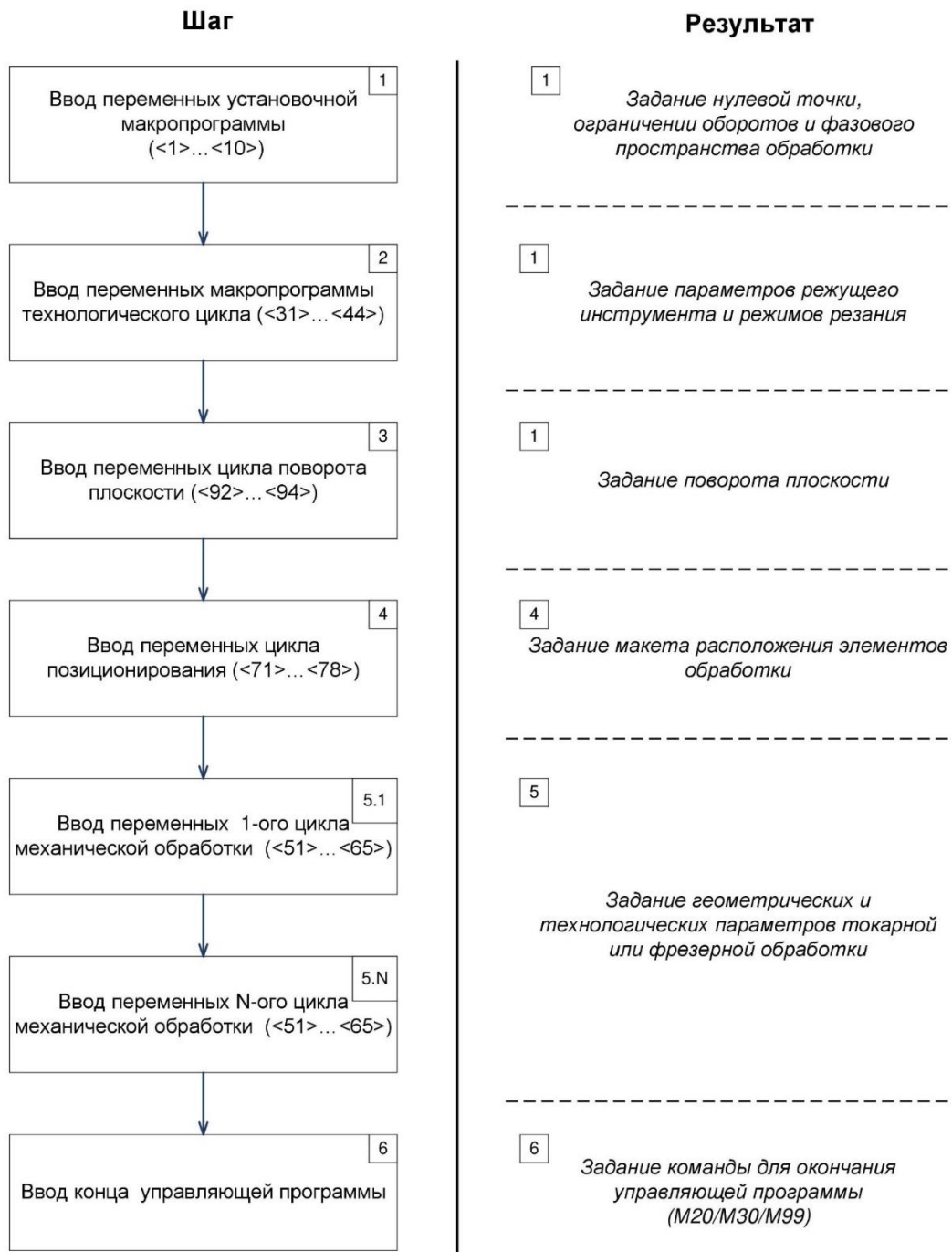


Рисунок 3 – Методика подготовки УП

Методика создания установочных макропрограмм инструментария основана на выявлении основных используемых параметров, определяющих стратегию перемещений режущего инструмента в процессе работы цикла. Макропрограммы обработки имеют общие переменные, что позволяет объединить их в определенный набор вспомогательных, но обязательных в

использовании макропрограмм: установочная макропрограмма, макропрограмма технологического цикла и макропрограмма, содержащая информацию о М-кодах.

Установочная макропрограмма содержит параметры, которые определяют положение нулевой точки заготовки, плоскостей безопасности, точки смены инструмента и максимальной скорости вращения шпинделя. Макропрограмма технологического цикла может использоваться совместно с одиночным циклом обработки или с последовательностью циклов при отработке одним инструментом.

Изменения переменных производятся повторным вызовом макропрограммы с последующим перезаписыванием локальных переменных, используемых в макропрограммах обработки. Установочная макропрограмма технологического цикла может использоваться совместно с одиночным циклом обработки или с последовательностью циклов в случае отработки одним инструментом.

Изменения переменных установочной макропрограммы технологического цикла можно производить её повторным вызовом перед каждым циклом обработки отличающимся от предыдущего номером инструмента, корректором или режимом резания с последующим перезаписыванием локальных переменных, используемых в цикле. Все разработанные циклы обработки осевым инструментом могут работать не только в predetermined плоскостях, но и в произвольной плоскости в пространстве. Это актуально для обработки наклонных поверхностей на вертикально-фрезерных станках, имеющих специализированную жестко фиксируемую поворотную головку на шпинделе. Деталь базируется как при обычной 3-х осевой обработке, а ось инструмента соответствует оси вектора нормали к обрабатываемой плоскости. При этом подходе обработка обычных плоских элементов (карманов, пазов, выступов) происходит с одновременным использованием 3-х осей: X, Y, Z. Поворот плоскости осуществляется следующим образом: базовая плоскость в системе координат станка последовательно вращается вокруг каждой из осей, при этом точки плоскости имеют координаты в системе координат поворачиваемой плоскости (Рисунок 4,а). При повороте происходит пересчет координат точек из системы координат плоскости в систему координат станка (Рисунок 4,б). Для расчета преобразования плоскости всеми представленными способами предварительные вычисления положения точки до поворота вокруг осей уже выполнены при разработке циклов на одной из predetermined

плоскостей (XY, ZX, YZ) и представлены переменными X_i, Y_i, Z_i . Систематизация переменных поворота плоскости представлена углами A, B, C вокруг осей X, Y, Z. В расчете принят поворот вокруг каждой оси в определенной последовательности: 1 - абсцисс, 2 – ординат, 3 – аппликат.

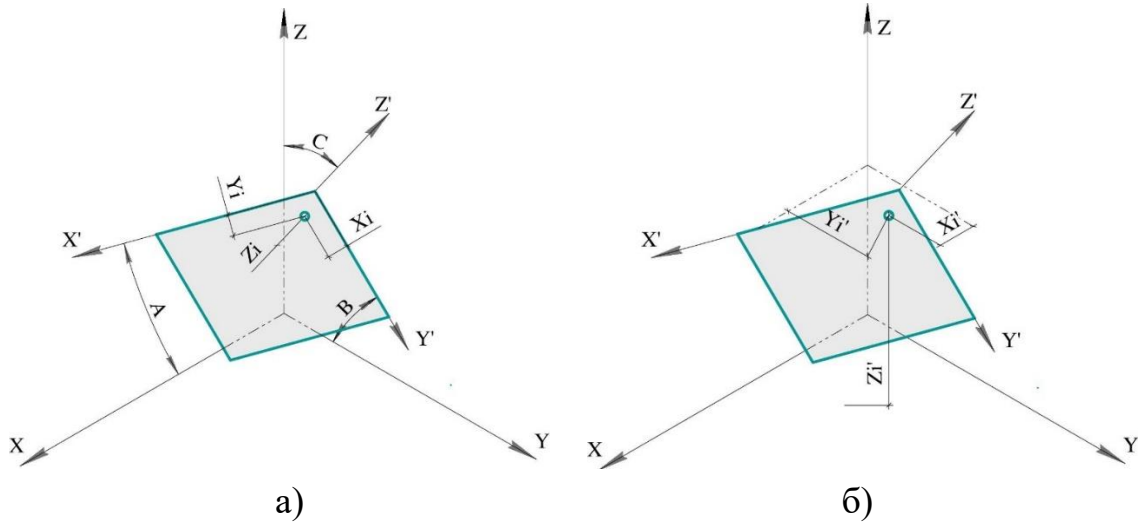


Рисунок 4 – Положение точки X_i, Y_i, Z_i после поворота плоскости вокруг осей абсцисс-ординат-аппликат в системе координат:
а) плоскости, б) станка.

Для расчета используются обратные матрицы поворота в трехмерном пространстве, полученная последовательным перемножением обратных матриц поворота (1-3) вокруг осей Oz, Oy, Ox. Обратная матрица поворота вокруг оси абсцисс имеет вид:

$$M_x^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\cos(A)}{\cos(A)^2 + \sin(A)^2} & \frac{\sin(A)}{\cos(A)^2 + \sin(A)^2} \\ 0 & \frac{-\sin(A)}{\cos(A)^2 + \sin(A)^2} & \frac{\cos(A)}{\cos(A)^2 + \sin(A)^2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_y^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(B)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} & 0 & \frac{-\sin(B)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{\sin(B)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} & 0 & \frac{\cos(B)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_z^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} & \frac{\sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} & 0 \\ \frac{-\sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} & \frac{\cos(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Для получения координат точек при повороте в очередности абсцисс – ординат – аппликат необходимо придерживаться последовательности, представленной следующими шагами:

- 1) Обратную матрицу Mz необходимо умножить на матрицу N , представленную известными точками Xi, Yi, Zi .
- 2) Обратную матрицу My умножить на матрицу, полученную в шаге 1.
- 3) Обратную матрицу Mx умножить на матрицу, полученную в шаге 2. В результате получится матрица (4).

$$P = Mx^{-1} \times (My^{-1} \times (Mz^{-1} \times N))$$

В матрице $P3$ каждая строка соответствует координате по определенной оси: 1 строка – значение проекции точки по оси абсцисс Xi' (4), 2 строка – значение проекции точки по оси ординат Yi' (5), 3 строка – значение проекции точки по оси аппликат Zi' (6).

$$X_i' = \frac{\cos(B) \times \left(\frac{X_i \times \cos(C) + Y_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} \right) - Z_i \times \sin(B)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} \quad (4)$$

$$Y_i' = \frac{\sin(A) \times \frac{Z_i \times \cos(B) + \sin(B) \times \left(\frac{X_i \times \cos(C) + Y_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} \right)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} + \cos(A) \times \frac{Y_i \times \cos(C) - X_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2}}{\cos(A)^2 + \sin(A)^2} \quad (5)$$

$$Z_i' = \frac{\cos(A) \times \frac{Z_i \times \cos(B) + \sin(B) \times \left(\frac{X_i \times \cos(C) + Y_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} \right)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} - \sin(A) \times \frac{Y_i \times \cos(C) - X_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2}}{\cos(A)^2 + \sin(A)^2} \quad (6)$$

При расчете в тело цикла передаются глобальные переменные с индексами <92>, <93>, <94>, принимающими значения углов А, В, С. В тело каждого цикла механообработки данные вычисления записываются массивом после каждого расчета постоянных и переменных координат цикла. Важно отметить, что для

корректной работы цикла также необходимо в каждой строке перемещения добавлять координату, отвечающую за глубину в рассматриваемой, так как значения по этой координате перестают быть модальными. Также перед каждой строкой перемещения необходимо постоянно вводить код расчета координаты, отвечающей за глубину, так как ее значения меняются в пространстве в зависимости от значений координат, отвечающих за линейные размеры.

Блок циклов позиционирования разработан для расчета координат каждой точки заданного массива. Циклы позиционирования могут задаваться как однократно, так и многократно как для одного цикла обработки, так и для группы циклов. Расчет каждой координаты происходит в отдельной макропрограмме, вызываемом из каждого цикла обработки.

В макропрограмме расчета в зависимости от выбранной плоскости обработки происходит вызов расчетного цикла обработки. Соблюдается правило 3-х вложений, когда из одной УП можно последовательно вызвать до 3-х подпрограмм. Рассчитанные координаты по осям записываются в глобальные переменные <81> и <82> для классически используемых плоскостей XY (G17), XZ (G18), YZ (G19) или в переменные <83> и <84> для плоскости обработки приводным инструментом на токарно-фрезерном станке с использованием оси шпинделя С.

В работе инструментария используется несколько массивов позиционирования: единичная, линия, рамка, сетка, дуга и многоугольник. Выбор массива зависит от простановки размеров на чертеже детали. Каждая позиция массива представлена 2-мя координатами: по оси абсцисс и оси ординат. Значения глобальных переменных, задающих расположение центра обрабатываемого элемента <81> по оси абсцисс и <82> по оси ординат, а также начального угла от оси абсцисс <88> пересчитываются в соответствии с используемым массивом и возвращаются в цикл обработки для корректного построения обрабатывающей траектории.

В четвертой главе выполнена разработка циклов типовых технологических переходов механической обработки на токарно-фрезерных и фрезерных станках с ЧПУ с использованием специализированного инструментария. Разработка методики создания универсальных циклов обработки основана на анализе существующих циклов и выявлении основных геометрических и технологических параметров, обеспечивающих формообразование и качество поверхностей, и дополнительных параметров, определяющих стратегию перемещений режущего инструмента в процессе

работы цикла. Для разработки методики во внимание были приняты циклы, присутствующие практически во всех рассматриваемых системах ЧПУ:

- циклы токарной обработки: многопроходное точение по заданным точкам, точение радиальных и торцевых канавок на цилиндрической и конической поверхностях, точение выточек на цилиндрической и конической поверхностях, точение резьбы, отрезка детали с понижением оборотов шпинделя и с использованием улавливателя деталей, сверление и нарезание резьбы метчиком по центру с вращающимся шпинделем и неподвижным инструментом;
- циклы обработки приводным инструментом, используемые как при токарно-фрезерной, так и при фрезерной обработке циклы позиционирования, сверления, нарезания резьбы метчиком, фрезерования продольного и кольцевого пазов, прямоугольных, круглых и многоугольных выступов, фрезерование резьбы.

Разработка каждой макропрограммы обработки начинается с определения последовательности переменных. В данном научном исследовании была разработана определенная последовательность переменных цикла:

- вариативные (расположение обрабатываемого элемента, чистота обрабатываемой поверхности, направление резания);
- технологические (скорость резания, рабочая подача, величина срезаемого слоя и припуск на чистовую обработку);
- геометрические параметры (диаметры, длины, углы, притупления).

После определения последовательности переменных идет расчет конечных точек движения режущего инструмента с учетом геометрических параметров инструмента из установочной макропрограммы технологического цикла.

Далее идет заикливание движений с использованием расчета промежуточных координат в зависимости от стратегии обработки (встречная или попутная, продольная или поперечная) и расположении обрабатываемого элемента (внутри, снаружи или на торце вала, во 1-ой или 2-ой плоскости обработки, в плоскости XY, XZ или ZY). Далее независимо от заданной чистоты обрабатываемой поверхности задается проход по конечным точкам элемента с припуском на чистовую обработку. Алгоритм работы циклов фрезерной обработки представлен на Рисунке 5.

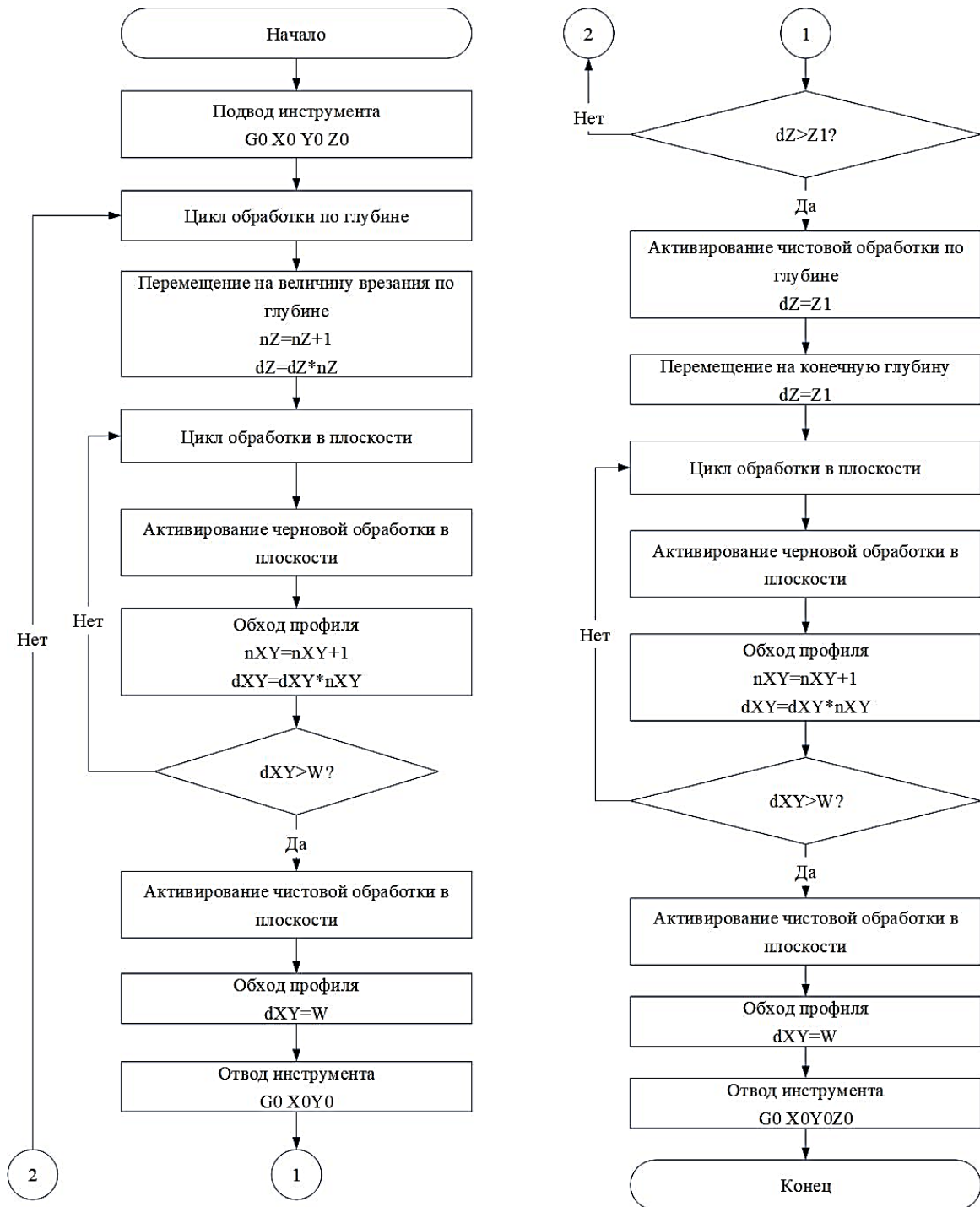


Рисунок 5 – Алгоритм работы циклов фрезерной обработки

В пятой главе приведены результаты проведенных испытаний специализированного инструментария посредством создания на нем УП обработки типовой детали для систем ЧПУ Fanuc, Siemens и АксиОМА Контрол и эмуляция разработанных УП с использованием специализированных программных и графических средств: Cimco Edit 8, Sinutrain for Sinumeric Operate v4.7 Lathe, AxiOMACtrlApplication.

Для получения результата, подтверждающего целесообразность применения разработанного инструментария в производственных условиях с целью снижения времени подготовки УП для станков токарной, токарно-фрезерной и фрезерной групп были произведены испытания по внедрению УП в производство и сравнения полученных результатов с использованием разработанного инструментария, САМ-систем и систем цехового уровня.

Испытания производились на базе станочного парка производственного предприятия. Для испытаний с использованием нерепрезентативной выборки были подобраны определенные детали токарно-фрезерной обработки, подготовка УП, для которых возможна с использованием всех рассматриваемых способов, а время разработки, редактирования и симуляции обработки у всех подобранных деталей примерно одинаково для минимизации погрешностей расчета времени внедрения в производство. В качестве примера представлен процесс разработки УП обработки детали с использованием специализированного инструментария.

Одной из главных задач исследования была разработка УП с одинаковой кинематикой, но разными системами ЧПУ с разным синтаксисом программирования. Исследования включали и испытания по оценке времени редактирования УП с использованием разработанного специализированного инструментария на токарно-фрезерных станках с ЧПУ Fanuc и Siemens по сравнению с временем редактирования УП на языке ISO-7Bit, разработанной с использованием САМ-системы NX и редактирования УП с использованием диалоговых систем цехового уровня Fanuc ManualGuide i и Siemens ShopTurn.

Текст УП в графическом интерфейсе инструментария представляет собой последовательность вызовов определенного порядка макропрограмм для системы ЧПУ Fanuc или функций для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол.

Эмуляция обработки по созданной УП в системе ЧПУ Fanuc произведена с использованием редактора УП Cimco Edit 8 с модулем Fanuc Turning G-code B (Рисунок 6,а), в системе ЧПУ Siemens – с использованием эмулятора Sinutrain for Sinumeric Operate v4.7 Lathe (Рисунок 6,б), в системе ЧПУ АксиОМА Контрол – с использованием эмулятора AxiOMACtrlApplication (Рисунок 6,в).

Разработка УП для тестовой детали велась с использованием разработанного инструментария, САМ-систем NX с постпроцессором для систем ЧПУ Fanuc и Siemens и САМ-системы Fusion с постпроцессором для системы ЧПУ АксиОМА Контрол, а также САМ-систем цехового уровня Siemens ShopTurn и Fanuc ManualGuide. Результаты испытаний приведены в

обобщенной Таблице 1. Они демонстрируют, что разработка и редактирование УП с использованием инструментария выполняется на 35% быстрее, чем с использованием CAD/CAM-систем и двух разных САМ-систем цехового уровня, то есть достигается снижение времени.

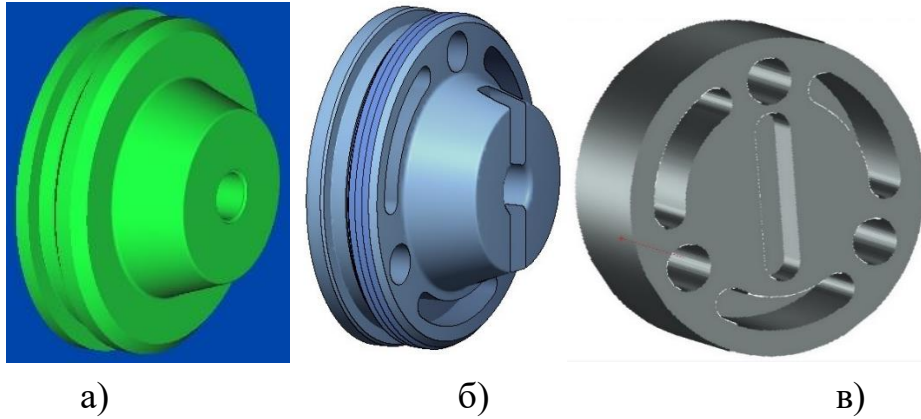


Рисунок 6 – Эмуляция обработки в системах ЧПУ:
а) Fanuc, б) Siemens, в) АксиОМА Контрол

Таблица 1 – Сравнительные результаты тестирования приложений для подготовки и внедрения в производство УП

Метод разработки УП	Инструментарий разработки УП	САМ-система NX, Fusion	Диалоговая система Siemens ShopTurn	Диалоговая система Fanuc ManualGuide
Время разработки УП, мин	20	40	20	40
Время эмуляции, мин	15 (5+5+5)	15 (5+5+5)	0	0
Время редактирования УП, мин	25	50	20	30
Время повторной эмуляции УП	15 (5+5+5)	15 (5+5+5)	0	0
Общее время подготовки УП, мин	75	120	40	70
Итоговое время внедрения УП	75	120	110 (40+70)	

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, связанной с сокращением времени подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ с использованием разработанного специализированного инструментария, имеющей существенное значение для машиностроительной отрасли.
2. На основе проведенного анализа существующих способов подготовки управляющих программ для токарных, токарно-фрезерных и фрезерных станков с ЧПУ выявлены основные требования к разрабатываемому специализированному инструментарию, установлены логические взаимосвязи между переменными, определяющими геометрию обрабатываемых элементов, и стратегию обработки, заложенную в станочных циклах и командах логического управления.
3. На основе установленных логических взаимосвязей разработана архитектурная модель специализированного инструментария, особенность которой состоит в расширении набора поддерживаемых систем ЧПУ и операционных систем, в формировании универсальных шаблонов разработки макропрограмм на языке высокого уровня и в многоуровневом взаимодействии программных модулей с галереей макропрограмм.
4. Разработана методика подготовки управляющих программ с использованием специализированного инструментария, основанная на правилах структурирования и расположения макропрограмм в системе ЧПУ.
5. Разработан набор макропрограмм типовых технологических переходов, представленных установочными макропрограммами, циклами поворота плоскости и позиционирования, токарными и фрезерными циклами, использующими единые наборы переменных, единую стратегию резания и единые команды логического управления для разных систем ЧПУ.
6. Полученные при апробации специализированного инструментария результаты указывают на возможность практического применения результатов диссертационной работы в промышленности на предприятиях машиностроительного профиля, занимающихся механической обработкой деталей на станках с ЧПУ, а также в учебном процессе при дипломном проектировании по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств», а эффективность разработанного специализированного инструментария подтверждена использованием результатов диссертации в рамках проектов НИР «МГТУ «СТАНКИН».

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕТАЦИИ

Статьи, опубликованные в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Фокин Н.Н. Разработка механизма взаимодействия установочных макропрограмм, циклов позиционирования, поворота плоскости и циклов обработки в системе числового программного управления / Вестник МГТУ «Станкин». – 2023. – № 3. – С.121-128.
2. Мартинова Л.И. Разработка и отладка с помощью цифрового двойника системы ЧПУ кроссплатформенного цикла фрезерования зубьев звездочек цепных передач / Л.И. Мартинова, Н.Н. Фокин, П.П. Беляков // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 5. – С.3-7.

Статьи, опубликованные в изданиях Web Of Science и Scopus:

3. Martinova L.I. Development of a Cross-Platform Software Application for Programming CNC Machine Tools / L.I. Martinova, N.N. Fokin // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) – 2023. – P. 616-622.
4. Martinov G.M. Development of toolkit for formalizing the programming of canned cycles on CNC machine tools / G.M. Martinov, L.I. Martinova, N.N. Fokin // MATEC Web of Conferences 346, 03098 (ICMTMTE-2021) – 2021. – P. 1-13.
5. Martinova L.I. Development of standardized tools for shopfloor programming of turning and turn-milling machines / L.I. Martinova, R.L. Pushkov, N.N. Fokin // In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (ICMTME-2020) – 2020. – Vol. 709, No. 4 – P.1-6.
6. Martinova L.I.. An approach to creation of a unified system of programming CNC machines in the dialog mode / L.I. Martinova, N.N. Fokin // In: MATEC Web Conference: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE-2018) – 2018. – Vol.224 – P.1-5.

Другие публикации автора:

7. Фокин Н.Н. Особенности написания управляющих программ с использованием языка высокого уровня и макропрограммирования // Научный электронный журнал Академическая публицистика. – Уфа: Аэтерна. – 2022. – №12-1. – С.31-35.
8. Фокин Н.Н. Разработка архитектурной модели кроссплатформенного инструментария для создания и отладки управляющих программ для токарных, токарно-фрезерных и фрезерных станков с ЧПУ // Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники: сборник статей

Международной научно–практической конференции. – Уфа: Аэтерна. – 2021. – С. 86-95.

9. Мартинова Л.И. Подход к созданию унифицированной системы программирования токарно-фрезерных станков с ЧПУ в диалоговом режиме / Л.И. Мартинова, Н.Н. Фокин // Автоматизация в промышленности. – 2019. – №5. – С.14-17.

10. Мартинова Л.И. Исследование и разработка унифицированного средства генерации управляющих программ. / Л.И. Мартинова, Н.Н. Фокин // Труды XVII-ой международной научно-практической конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2017) – М. : ИПУ РАН. – 2017. – С.361-364.

Объекты интеллектуальной собственности автора:

11. Фокин Н.Н., Умнов П.И., Шелобанов А.М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021611934 «Портативный диалоговый программный комплекс для разработки и редактирования управляющих программ токарных, токарно-фрезерных и вертикально-фрезерных станков с ЧПУ» от 09.02.2021.