

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Мартинова Лилия Ивановна

Москва – 2023

## Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Анализ современных способов подготовки управляющих программ.....	12
1.1 Особенности создания управляющих программ с использованием автоматизированных систем подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ.....	18
1.2 Особенности написания управляющих программ с использованием диалоговых САМ-систем цехового уровня.....	21
1.3 Особенности написания управляющих программ с использованием языка высокого уровня и макропрограммирования.....	22
1.4 Обоснование выбора среды разработки.....	25
1.5 Выводы по главе 1.....	26
Глава 2. Разработка архитектурной модели инструментария подготовки управляющих программ для токарных, токарно-фрезерных и фрезерных станков с ЧПУ.....	27
2.1 Выявление требований к концептуальной модели инструментария.....	29
2.2 Разработка архитектурной модели инструментария.....	31
2.3 Разработка алгоритма работы инструментария.....	37
2.4 Разработка пользовательского интерфейса инструментария.....	38
2.5 Разработка методики расширения применимости и расширения опций инструментария.....	39
2.6 Выводы по главе 2.....	42
Глава 3. Разработка методики программирования с использованием инструментария.....	43
3.1 Разработка механизма взаимодействия установочных макропрограмм в системе числового программного управления.....	43

3.2 Разработка установочной макропрограммы.....	46
3.3 Разработка установочной макропрограммы технологического цикла.....	48
3.4 Разработка циклов поворота плоскости.....	50
3.5 Разработка циклов позиционирования.....	58
3.6 Выводы по главе 3.....	72
Глава 4. Разработка циклов типовых технологических переходов механической обработки на токарно-фрезерных и фрезерных станках с ЧПУ.....	74
4.1 Методика создания циклов .....	74
4.2 Циклы токарной обработки.....	77
4.3 Циклы сверления и фрезерования .....	89
4.4 Выводы по главе 4.....	109
Глава 5. Проверка инструментария разработки управляющих программ .....	110
5.1 Разработка управляющей программы тестовой детали в среде инструментария .....	110
5.2 Эмуляция обработки в системах ЧПУ .....	115
5.3 Сравнение результатов использования различных способов подготовки и редактирования управляющей программы.....	120
5.4 Применение инструментария в учебном процессе.....	124
5.5 Выводы по главе 5.....	125
Заключение .....	126
Список литературы .....	128
Приложения А. Управляющая программа в графическом интерфейсе инструментария в обезличенном виде .....	140
Приложения Б. Листинг кода управляющей программы обработки типовой детали для системы ЧПУ Fanuc.....	142

Приложения В. Листинг кода управляющей программы обработки типовой детали для системы ЧПУ Siemens.....	143
Приложения Г. Листинг кода управляющей программы обработки типовой детали для системы ЧПУ АксиОМА Контрол .....	144

## Введение

**Актуальность темы исследования.** Проблема переносимости и редактирования управляющих программ на системах числового программного управления от разных производителей обусловлена отличающимся синтаксисом языков высокого уровня систем ЧПУ, а также дифференциацией способов подготовки управляющих программ в процессе внедрения новой продукции в производство [1].

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 [2].

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

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

**Степень разработанности исследования.** Проблемам разработки систем подготовки управляющих программ 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 управляющих программ [3]. 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 [4].

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 машиностроении 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 машиностроении 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.

На основе результатов работы создан 1 объект интеллектуальной собственности в виде свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**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 WebOfScience 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.

## **Глава 1. Анализ современных способов подготовки управляющих программ**

В условиях современного производства можно выделить несколько наиболее используемых методов разработки управляющих программ для токарно-фрезерных станков с ЧПУ:

- для среднесерийного и крупносерийного производства используются CAD/CAM-системы с постпроцессорами и 3D-моделями существующего в парке предприятия оборудования [5];
- для мелкосерийного и среднесерийного производства применяется программирование с использованием диалоговых САМ-систем цехового уровня (не все системы ЧПУ имеют данный инструментарий, а набор циклов и количественный и качественный состав переменных различается у разных модификаций одного производителя систем ЧПУ) [6];
- для опытного, единичного и мелкосерийного производства можно выделить программирование вручную с использованием циклов, функций, макрокоманд и языка высокого уровня с использованием уникального синтаксиса каждой используемой системы ЧПУ [7].

Производители систем ЧПУ и программного обеспечения предлагают различные решения для разработки управляющих программ для станков с ЧПУ. В настоящее время на предприятиях машиностроительной отрасли для автоматизации технологической подготовки широко распространены полноценные системы автоматизированной разработки управляющих программ: NX, Autodesk Fusion 360, ADEM, SprutCAM, EdgeCAM, FutureCAM, а также системы цехового программирования ManualGuide от Fanuc, ShopMill и ShopTurn от Siemens, Dialog от Heidenhain и Mazatrol от Mazak, позволяющие программировать с использованием G-кода и стандартных циклов [8]. Разработчики систем ЧПУ предоставляют пользователям возможность расширенного программирования с

использованием высокоуровневых языков программирования на базе языков программирования 3-го поколения типа C, PASCAL, BASIC [9].

Применяемость тех или иных решений на предприятиях определяется задачами и возможностями CAD/CAM-систем. CAD/CAM-системы должны располагать специализированным инструментарием для обеспечения заменимости оборудования и непрерывной работы производственного цикла: постпроцессорами для каждой системы ЧПУ и виртуальными моделями станков, на которых будет производится эмуляция работы и редактирование управляющей программы [10]. Для программирования обработки сложно-профильных деталей на много-осевом оборудовании, когда одновременно работают 3 и более осей, CAD/CAM-системы зачастую являются безальтернативным решением [11].

CAM-системы диалогового программирования цехового уровня, в которых используется параметрическое задание станочных циклов, а управляющие программы создаются и вводятся непосредственно в системы ЧПУ на экране оператора с системой меню, графических пиктограмм и клавиатуры, находят довольно широкое применение на машиностроительных предприятиях не только в единичном и мелкосерийном, но и в среднесерийном производстве [12]. Все циклы в системах диалогового программирования имеют строго определенный набор геометрических и технологических параметров, не всегда позволяя программисту запрограммировать необходимые действия, например, назначить точение обрабатываемого контура с предварительно определенной координатой перехода из поперечного обратного точения в продольное прямое – данный способ применяется для лучистовой обработки поверхностей заготовок, полученных штамповкой для избегания появления чрезмерной нагрузки на инструмент ввиду изменения величины срезаемого слоя [13].

Встраивание собственных циклов является довольно сложной задачей. Инструментарий программирования на языках высокого уровня, несмотря на сложности, связанные с использованием алгоритмических конструкций, позволяет создавать гибкие параметрические управляющие программы, работать с

переменными в процессе выполнения программ, организовывать библиотеки подпрограмм и станочных циклов для многократного применения [14].

Системы цехового программирования позволяют создавать управляющие программы для обработки до 90% типовых несложных деталей, обрабатываемых с одновременным использованием не более 3-х осей. Диалоговое программирование систем ЧПУ осуществляется путем последовательного выбора и введения параметров циклов обработки типовых поверхностей. Сформированные таким образом управляющие программы сохраняются в библиотеках и могут впоследствии быть использованы по мере необходимости [15].

В реальных производственных условиях часто приходится выполнять обработку заготовки на станке, оснащенный не той системой ЧПУ, для которой была создана управляющая программа. И здесь часто сталкиваются с проблемой переноса созданных в таких САМ-системах управляющих программ в конкретную систему ЧПУ станка, поскольку эти управляющие программы не могут учесть специфику систем управления и синтаксис программного кода разных производителей и работают только на «своих» системах ЧПУ [16]. Это связано с тем, что каждая система ЧПУ использует свою логику организации перемещений, основанную на стандартных G-кодах (G0, G1, G2, G3) и форму задания геометрических и технологических переменных для каждого типа обработки [17]. Кроме того, формы задания количества и значения переменных циклов для обработки одинаковых геометрических элементов различаются у систем ЧПУ разных производителей, например, надстройки систем ЧПУ Fanuc ManualGuide и Siemens ShopTurn имеют существенные различия по составу и количеству вводимых данных. В управляющих программах Siemens ShopTurn вспомогательные M-команды заложены в исходные циклы обработки и автоматически подключаются при генерации программы, а в программах Fanuc ManualGuide в формы заложены только геометрические параметры, а вспомогательные команды (смена инструмента, включение/выключение шпинделя, СОЖ и др.) вводятся вручную [18]. Подобные обстоятельства делают

невозможным использование управляющих программ, написанных в модуле Siemens ShopTurn, на станках с системами ЧПУ Fanuc и наоборот [19]. Возникает необходимость разработки инструментария, позволяющего написанную в нем управляющую программу использовать в разных системах ЧПУ.

При переносе с одних систем ЧПУ на другие фрагментов управляющих программ, написанных в G-коде, проблем практически не возникает. Сложности связаны с интерпретацией и исполнением станочных циклов [20].

Анализ показывает, что унифицированная форма цикла должна учитывать:

- 1) геометрию обрабатываемых конструктивных элементов: длина, ширина, диаметр, углы наклона и др.;
- 2) режимы обработки: скорость, подача, величина врезания и стратегия обработки;
- 3) последовательность выполнения рабочих и вспомогательных ходов инструмента.

Анализ отечественных и зарубежных научных работ, посвященных оптимизации процесса подготовки и отладки управляющих программ для токарных и фрезерных станков с ЧПУ, привел к выводу о том, что разрабатывались отдельные решения в области подготовки и отладки управляющих программ в единичном и мелкосерийном производстве.

С одной стороны, были предложены методы, основанные на расширении возможностей имеющихся CAD/CAM-систем для реализации обработки типовых поверхностей непосредственно в интерфейсе графической системы посредством создания в рамках CAD/CAM-систем дополнительных масок ввода переменных вновь созданных циклов [22]. Но при этом не учитывалась гибкость отладки разработанной программы в производственных условиях на станке, потому что управляющая программа представляла из себя трудно редактируемый G-код.

С другой стороны, акцент был сделан на специфику разработки постпроцессоров, которые создавались с учетом имеющихся станочных циклов для каждой отдельно взятой системы ЧПУ [23]. Применение данного метода дает

положительный результат при однородном станочном парке оборудования с одинаковыми системами ЧПУ, на производствах, периодически пополняемых новым, и, что самое важное – отличным от имеющегося оборудованием с отличающимися системами ЧПУ (или моделями систем ЧПУ одного производителя), данный метод не может полноценно работать из-за различия реализации программного кода и разным представлением станочных циклов разными системами ЧПУ, а также наличием определенных циклов в одних системах и отсутствием в других, что непременно приводит к использованию комбинации первого и второго методов, при которой управляющая программа частично состоит из циклов, а частично написана в G-коде [24]. Это также облегчает процесс разработки управляющих программ, но также усложняет процесс редактирования.

С третьей стороны рассматривались решения в области расширения возможностей систем ЧПУ за счет разработки и встраивания в систему новых циклов, написанных на языках высокого уровня под определенный имеющийся алгоритм построения циклов [25]. Но эти решения не были систематизированы и работали в узкой предметной области, были использованы только на определенных станках с определенными системами ЧПУ. Одни и те же циклы для разных систем ЧПУ разрабатывались с разным синтаксисом, что не позволило унифицировать их [26].

С позиции использования станков с ЧПУ при механической обработке всю деталь можно описать типовыми поверхностями по расположению: наружные и внутренние; по образующей поверхности: цилиндрические и конические; по доступности обработки: открытые и закрытые; по применяемости циклов: монотонный токарный контур, канавка, выточка, карман, паз, выступ, резьба. Поверхности могут быть представлены так же типовым набором циклов позиционирования: линия, окружность. Система ЧПУ позволяет выполнять их обработку с использованием специальных циклов как в САМ-системах, так и САМ-системах цехового уровня (Таблица 1.1) [21].

Таблица 1.1 – Представление типовых поверхностей циклами систем ЧПУ

<b>Типовая поверхность / массив позиций</b>	<b>Цикл системы ЧПУ Fanuc</b>	<b>Цикл системы ЧПУ Siemens</b>	<b>Цикл системы ЧПУ АксиОМА Контрол</b>
Продольный паз	-	Slot1	G388
Кольцевой паз	-	Slot2	-
Продольный паз	-	Slot1	G388
Кольцевой паз	-	Slot2	-
Прямоугольный карман	-	Pocket3	G387
Круглый карман	-	Pocket4	G389
Прямоугольный выступ	-	Cycle76	-
Круглый выступ	-	Cycle77	-
Многоугольный выступ	-	Cycle79	-
Монотонный контур	G71	Cycle95	-
Токарная канавка	G75, G74	Cycle93	G288, G289
Токарная выточка	-	-	G281
Резьба	G76, G84	Cycle97, 84, 70	G276
Отверстие	G83	Cycle83	G83
Массив линия	-	Holes1	-
Массив рамка	-	Cycle801	-
Массив сетка	-	Cycle801	-
Массив окружность	-	Holes2	-
Массив дуга	-	Holes2	-

Таким образом, можно установить, что проблема сокращения времени не только разработки, но и редактирования управляющих программ в условиях производства имеет отдельные, не систематизируемые решения, основанные на улучшении, с одной стороны, систем разработки и проектирования (CAD/CAM-систем), а с другой стороны – локальные улучшения отдельно взятых систем ЧПУ, что делает вывод о необходимости к комплексному подходу в решении данной задачи. Подходу, основанному на разработке станочных циклов, их

систематизации для разных систем ЧПУ и создании специализированного программного средства, позволяющего автоматизировать этот процесс. То есть создании как программной части для использования на персональном компьютере, так и универсального расширяемого набора циклов, встраиваемых в систему ЧПУ и взаимодействующих друг с другом через код управляющей программы.

### **1.1 Особенности создания управляющих программ с использованием автоматизированных систем подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ**

Автоматизированные системы подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ (CAD/CAM-системы) позволяют программировать обработку поверхностей любой сложности, с использованием модели детали, исключая необходимость проводить математические вычисления вручную [27]. CAD/CAM-системы позволяют создавать на одном базовом языке программирования управляющие программы для различных систем ЧПУ и обеспечивают технолога функциями автоматизации процесса обработки. Но дороговизна как самих CAD/CAM-систем, так и дополнительного инструментария (постпроцессоров, 3D-моделей станков и инструментов) делает их доступными лишь для крупных предприятий, с широкой номенклатурой часто изменяющихся деталей [28]. Часто пользователи сталкиваются с проблемой конвертации конструкторской модели в CAD/CAM-систему, используемую программистом – некоторые элементы могут не читаться или интерпретироваться не так, как задумано в конструкции. Также, при использовании специальных приспособлений для фиксации заготовок на станке, необходимо иметь и их 3D-модели для корректного построения траекторий, иначе программист вынужден тратить время на их проектирование, что, как следствие, увеличивает время технологической подготовки производства [29]. В настоящем научном исследовании CAD/CAM-системы можно классифицировать

по работе постпроцессора и взаимодействию системы с виртуальным инструментальным магазином. Например, CAD/CAM-системы NX, Fusion 360 и EdgeCam имеет специализированный инструментарий постпроцессирования, обобщенные модели станков токарной и фрезерной групп, а подстановка режущих инструментов из встроенного магазина системы осуществляется автоматически [30]. Каждая САМ-система также имеет схожий функционал по использованию режущих инструментов, присутствуют только различия в интерфейсе параметризации [31]. Классификация типов и геометрии режущего инструмента представлены в Таблице 1.2. Все рассмотренные САМ-системы обладают схожим комплексом выполняемых вычислительных функций, при этом каждая из САМ-систем формирует отличающуюся от других систем траекторию движения рабочего и холостого хода режущего инструмента. Каждая САМ-система использует встроенные алгоритмы задания заголовков технологических переходов (задания скорости резания определенного перехода, рабочей подачи, смены инструмента, управления вспомогательной электроавтоматикой), учитывая специфику использования M-кодов определенной системы ЧПУ [32]. Насколько точно будет выполнена обработка, имеются ли какие недостатки, с помощью средств моделирования САМ-систем, сказать невозможно [33]. Практически все САМ-системы работают на базе операционной системы Windows и требуют высокопроизводительной аппаратной базы, исключением является NX, работающий и на Windows и MacOS.

Все CAD/CAM-системы имеют схожие алгоритмы разработки постпроцессоров и моделирования кинематической модели станка, которые включают:

- 1) заполнение масок ввода вспомогательных M-кодов (если нет виртуальной и технической модели станка), разработанных под конкретную CAD/CAM-систему;
- 2) задание зоны безопасности вблизи обрабатываемой детали, необходимой для корректного отвода режущего инструмента на холостом ходу по завершении рабочего движения резания;

3) задание точки смены инструмента, а при наличии вспомогательных механизмов (задней бабки, дополнительного инструментального суппорта, контршпинделя) задание их геометрических параметров для исключения столкновения в процессе обработки или при смене инструмента.

Таблица 1.2 – Геометрические параметры режущих инструментов, используемых для их моделирования в CAD/CAM-системах

<b>Название параметров</b>				
<b>Тип инструмента</b>	<b>Геометрические параметры</b>			
Резец для наружной / внутренней обработки	Угол в плане		Угол режущей кромки	Радиус режущей кромки
Резец для обработки канавок	Ширина режущей кромки		Длина пластины	Радиус режущей кромки
Резец для точения наружной / внутренней резьбы	Угол режущей кромки		Ширина пластины	Радиус режущей кромки
Осевой инструмент (сверло, зенкер)	Диаметр инструмента		Длина рабочей части	Угол режущей кромки
Метчик	Диаметр инструмента		Длина рабочей части	Шаг метчика
Концевая фреза	Диаметр инструмента	Количество зубьев	Длина режущей части	Радиус скругления зубьев
Дисковая / грибковая фреза	Диаметр инструмента	Количество зубьев	Длина режущей части	Ширина режущей части

## 1.2 Особенности написания управляющих программ с использованием диалоговых САМ-систем цехового уровня

Симулятор токарно-фрезерной обработки системы ЧПУ Fanuc ManualGuide – это встроенный программный комплекс подготовки управляющих программ с использованием осевых и радиальных осей. Код программы представляет собой последовательность 4-значных G-кодов, отвечающих за каждый вызываемый цикл (например, цикл многопроходного радиального сверления с отскоком задается с использованием кода G1101 K M Q,) [34]. Особенностью модуля ManualGuide является режим единого диалогового окна с различным количеством вкладок, отвечающих за определенные группы геометрических или технологических параметров, к недостаткам можно отнести невозможность отредактировать строки программного кода вне вызываемого диалогового окна, а также необходимость программирования строки безопасности и всей основной технологической информации для каждого технологического перехода: задание отвода, выбора инструмента, корректора, задание скорости резания и единиц измерения рабочей подачи [35].

Симулятор токарно-фрезерной обработки системы ЧПУ Siemens ShopTurn – это среда подготовки управляющих программ в одном или двух шпинделях с использованием осевых и радиальных поворотных осей. Программирование обработки осуществляется как в диалоговом режиме, так и с использованием кода ISO-7 bit. В составе модуль Siemens ShopTurn имеется интерфейс оператора, основанный на масках ввода, возможность прямого программирования контура обработки во всех известных плоскостях (XY, XZ, YZ) и визуализация отработки управляющей программы в объеме. Однако редактировать управляющие программы вне интерфейса системы ЧПУ невозможно [36].

Рассмотренные цеховые системы диалогового программирования, как правило одноцелевые – рассчитаны под конкретное оборудование, в систему ЧПУ, которого они интегрированы [37]. Основным и главным недостатком является

невозможность использования написанных управляющих программ в других системах ЧПУ или других версиях данного программного обеспечения от того же производителя [38]. Например, программу, написанную на ShopTurn Siemens 840D нельзя интегрировать в более раннюю версию Siemens 810, аналогично у системы ЧПУ Fanuc – управляющая программа, написанную в ManualGuide 2ого поколения нельзя использовать в более ранней версии из-за различного синтаксиса вызова 4х-значных G-кодов.

### **1.3 Особенности написания управляющих программ с использованием языка высокого уровня и макропрограммирования**

Макропрограммирование в системах ЧПУ подразумевает расширение стандартного инструментария систем ЧПУ благодаря использованию операндов языка высокого уровня в программировании траекторий режущего инструмента и задании нелинейных стратегий обработки [39].

Производители систем ЧПУ используют макропрограммирование в качестве расширения G-кода. Отличия макропрограммирования от классического в G-коде представлены в Таблице 1.3.

Макропрограммирование позволяет задействовать необходимое количество переменных, которыми могут быть представлены геометрические (длины, диаметры, углы) и технологические (скорость резания, подача, величина съема и припуска на чистовую обработку) параметры для расширенного программирования стандартных циклов механической обработки [40]. Например, можно запрограммировать задание чистового припуска по осям X, Y и Z, задать притупления острых кромок радиусами или фасками, сделать пересчет из угловых величин в линейные.

Макропрограммирование обеспечивает сокращение времени разработки УП за счет оптимизации использования G-функций и станочных циклов, что

востребовано для серийного и крупносерийного производства [41]. В параметрических программах можно использовать как глобальные, так и локальные переменные. Глобальными переменными можно задать многократно повторяющиеся в управляющей программе значения: координаты точки смены инструмента, величины плоскостей безопасности, максимальные обороты шпинделя, тип подвода-отвода режущего инструмента к детали и от детали. Внутри вызываемых подпрограмм можно заикливать любые типы рабочих движений, использовать постоянные циклы, расширяя их технологические возможности [42]. В параметрическом программировании ЧПУ можно использовать операнды стандартных языков программирования: if, while, do, for, goto, что позволяет создавать многоуровневые условия для задания сложной технологической обработки [43].

Таблица 1.3 – Отличия классического от параметрического программирования

<b>Способ подготовки УП</b>	<b>Изменение характера движения резания</b>	<b>Изменение режимов резания</b>	<b>Управление устройствами</b>
классическое программирование ISO-7Bit	Перестроение стратегии обработки в САМ-системе	Изменение параметров обработки в САМ-системе	Изменением вспомогательных параметров обработки в САМ-системе
Параметрическое программирование	Изменение нескольких переменных в тексте функции вызова подпрограммы	Изменением режимов резания перед вызываемой подпрограммой	Добавлением или удалением необходимых M-кодов перед вызываемой подпрограммой

Языком макропрограммирования системы ЧПУ АксиОМА Контрол является аналог языка на основе стандарта ANSI C. Он соответствует специфике применения в задачах системы ЧПУ, таких как: работа со строковыми

параметрами, математические операции, управление запуском программ и предусматривает встроенный набор функций и макросов [44].

В системе ЧПУ Fanuc используется язык макропрограммирования MacroB. Символом переменной в MacroB является знак #. Раздел памяти системы ЧПУ, участвующий в процессе отработки макропрограмм обычно называется MACRO или VARIABLES. Все переменные системы ЧПУ можно разделить на 3 типа: локальные, которые могут быть использованы внутри макросов для хранения данных; общие переменные, которые могут работать внутри различных параметрических программ и макросов; системные переменные, которые используются для чтения и записи различной системной информации – данных о позиции инструмента, величинах компенсации, времени [45].

В системе ЧПУ Siemens макропрограммирование осуществляется с использованием локальных переменных, глобальных R-переменных и системных переменных “\$”. Ветвление в структуре макропрограммы осуществляется с использованием операндов “while-endwhile”, “if-endif”, “goto”. При этом можно отметить, что область макропрограмм не ограничена только областью пользовательских циклов (WPDUSERCYCLES), но и в тексте управляющих программ, разработанных с использованием модуля ShopTurn [46].

Все разрабатываемые в настоящей научной работе циклы и функции выполнены с использованием всех особенностей синтаксиса того макроязыка, который актуален для рассматриваемых систем ЧПУ. Например, для системы ЧПУ Siemens – это язык вывода встроенных функций, возвращающих значения локальным переменным, соответствующим типам INT и REAL, для системы ЧПУ Fanuc использовался многократный немодальный вызов макропрограммы с использованием кода G65 и локальных переменных #1-#26, которым соответствуют символы «A-Z», для системы ЧПУ АксиОМА Контрол реализация циклов осуществляется вызовом функций, возвращающих значения локальным переменным, соответствующим типам long и double [47].

## 1.4 Обоснование выбора среды разработки

Помимо операционной системы Windows, поддерживающей абсолютное большинство CAD/CAM-систем, для ускорения технологической подготовки производства разработку управляющих программ для механообрабатывающих станков с ЧПУ в цеховых условиях можно осуществлять на портативных устройствах под управлением операционной системы Android. Инструменты разработки приложений SDK Platform-Tools предоставляются правообладателем бесплатно, но в то же время, в Play Market нет приложений для комплексной подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ – среди приложений, поддерживающих вывод кода управляющей программы можно выделить следующие: SmartMMCNC, SmartMTCNC, CNC TOOLS PLUS, NcTools, CNC Turning Program Application. Эти приложения позволяют произвести проектирование токарной и фрезерной обработки в виде кода ISO-7Bit.

Отсутствие приложений комплексной разработки управляющих программ обосновано тем, что аппаратная часть устройства с ОС Android не имеет прямого соединения с аппаратной частью станков, в отличие от операционной системы Windows, где подключиться практически к любому станку можно по кабелю Ethernet, и отсутствием модулей беспроводной связи на оборудовании и, как следствие, необходимостью создания дополнительного звена между устройствами – файлового сервера с функцией беспроводной передачи данных, что в условиях секретности отдельных предприятий недопустимо [48].

С другой стороны, разработку управляющих программ для изготовления относительно несложных деталей можно и даже нужно переводить на мобильные платформы, аппаратное обеспечение которых позволяет запускать диалоговый режим без задержек и генерировать код, при этом время подготовки управляющих программ в цеховых условиях будет снижено.

## 1.5 Выводы по главе 1

1. Разработка управляющих программ в CAD/CAM-системах обеспечивает обработку детали высокой сложности поверхностной обработки благодаря использованию постпроцессоров. Главными проблемами использования CAD/CAM-систем являются невозможность редактирования разработанной управляющей программы на станке и необходимость в параметризации режущего инструмента в системе ЧПУ в соответствии с используемым в управляющей программе, что увеличивает время внедрения деталей в производство.

2. Программирование с использованием диалогового режима в системах ЧПУ предусматривает быстрое редактирование управляющей программы через интерфейс оператора. Основной проблемой является невозможность редактирования разработанной управляющей программы вне диалоговой системы и переноса управляющей программы на другие системы ЧПУ.

3. Программирование на языке высокого уровня позволяет создавать пользовательские циклы с использованием необходимого набора переменных. Главным достоинством является возможность быстрого перевода управляющего кода циклов в синтаксис другой системы ЧПУ. Основным недостатком является сложность программирования, требующая высокой квалификации исполнителя.

6. Основываясь на полученных выводах в результате проведенного анализа способов подготовки управляющих программ, было принято решение о необходимости создания специализированного инструментария, обеспечивающего разработку управляющих программ на одном базовом языке программирования, имеющего пользовательский интерфейс как в САМ-системах цехового уровня и позволяющего расширять циклы с использованием макропрограммирования. Это позволило сформулировать цель работы и поставить научную задачу для ее достижения.

## **Глава 2. Разработка архитектурной модели инструментария подготовки управляющих программ для токарных, токарно-фрезерных и фрезерных станков с ЧПУ**

Необходимость разработки модели инструментария подготовки управляющих программ для токарных, токарно-фрезерных и фрезерных станков в диалоговом режиме с наиболее распространенными на рынке системами ЧПУ, такими как Fanuc, Siemens и наиболее перспективной в плане программного расширения пользовательского функционала системой ЧПУ российской разработки АксиОМА Контрол, появилась из-за недостаточной гибкости существующих CAD/CAM-систем при редактировании управляющих программы в цеховых условиях [49]. Несмотря на расширенный функционал и возможность работы с 3D-моделями, одной из проблем при использовании CAD/CAM-систем является вывод управляющих программ в коде ISO-7Bit или в специализированных циклах, поддерживаемых только той системой ЧПУ, для которой разработана управляющая программа [50]. При изменении геометрии детали в связи с изменением чертежа или при проведении опытных конструкторских работ, подразумевающих изготовление нескольких одинаковых по форме, но разных по размерам деталей в CAD/CAM-системе необходимо перестраивать модель детали, а при изменении стратегии обработки – переназначать плоскости обработки. Формируемый код практически невозможно изменить в цеховых условиях из-за большого объема, так как все рабочие и холостые движения режущего инструмента выполняются посредством стандартного G-кода: G0, G1, G2, G3 [51].

Если в процессе отработки управляющей программы появляются подавление кадров в управляющей программе, необходимо перестраивать модель детали в CAD/CAM-системе, а после этого проводить повторную верификацию на станке [52]. Частично проблема решается использованием циклов, но правила программирования циклов принципиально отличаются. Логические взаимосвязи между переменными, определяющими геометрию обрабатываемых элементов, и

переменными, определяющими стратегию обработки, заложенную в станочных циклах и командах логического управления в системах ЧПУ Fanuc, Siemens и АксиОМА Контрол представлены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Логические взаимосвязи между переменными в циклах систем ЧПУ

<b>Правило</b>	<b>Fanuc</b>	<b>Siemens</b>	<b>АксиОМА Контрол</b>
Синтаксис циклов	G71-G87	Cycle70-Cycle97	G81-G83, G276-G288
Синтаксис вызова циклов	В 3 строки: 1 – вызов инструмента, подход к начальной точке с подачей холостого хода 2 – ввод технологических переменных, 3 – ввод геометрических переменных	В виде функции, где вначале строго технологические переменные, потом геометрические	В 2 строки: 1 – вызов цикла с Q-переменными, 2 – задание начальной точки цикла
Синтаксис переменных	A... Z	DEF REAL, DEF INT, DEF BOOLEAN, DEF STRING [...]	Q1-Q16
Использование команд логического управления M0...M999	нельзя вызвать 2 M-кода в 1м кадре, есть объединение 2-х независимых M-кодов в 1 (СОЖ и вращение по часовой стрелке M13)	можно вызвать 2 M-кода в 1м кадре, есть объединение 2-х независимых M-кодов в 1	можно вызвать 2 M-кода в 1м кадре, нет объединения 2-х независимых M-кодов в 1

Параметры каждого цикла систем ЧПУ Fanuc, Siemens и АксиОМА Контрол отличаются количеством переменных и последовательностью ввода, что делает невозможным перенос программ, разработанных для одной системы ЧПУ на другую без дополнительной доработки [53]. В качестве решения обозначенных проблем возникает вопрос о создании специализированного инструментария, работающего на разных ОС и способного взаимодействовать с разными системами ЧПУ.

## **2.1 Выявление требований к концептуальной модели инструментария**

Подготовка управляющих программ для токарных, токарно-фрезерных и фрезерных станков с ЧПУ с использованием специализированного инструментария должна способствовать уменьшению временных затрат как на подготовку, так и на редактирование управляющих программ, что имеет актуальность для мелкосерийного производства. В основе методики заложен метод разработки как с использованием алгоритмов инструментария, так и редактированием кода управляющей программы непосредственно в системе ЧПУ. Кроссплатформенность позволяет портировать инструментарий на операционные системы Windows и Android благодаря написанию исходного кода в обезличенном виде в среде разработки, позволяющей компилировать инструментарий в одну из операционных систем из встроенной библиотеки [54].

В настоящей научной работе инструментарий ограничивается поддержкой разработки управляющих программ для систем ЧПУ Fanuc, Siemens и АксиОМА Контрол (при необходимости список поддерживаемых систем ЧПУ может быть расширен) и генерирует управляющий код, учитывая все особенности синтаксиса вызова макропрограмм. При этом управляющий код должен быть унифицированным для систем ЧПУ Fanuc, Siemens и АксиОМА Контрол. Разработанные циклы должны иметь единую логику перемещений: отвод в точку

смены инструмента, отключение модальных G-кодов, не используемых в макропрограмме, включение используемой в цикле электроавтоматики станка, задание скорости резания и направления вращения шпинделя или приводного инструмента, задание рабочей подачи, исполнительные перемещения цикла, выключение электроавтоматики и отвод инструмента в точку смены. Управляющая программа должна содержать в себе только команды активации макропрограмм с заданием локальных переменных каждого цикла.

К разрабатываемому инструментарию предъявлены следующие требования:

- 1) возможность разработки управляющих программ через интерфейс инструментария для систем ЧПУ Fanuc, Siemens и АксиОМА Контрол;
- 2) создание управляющей программы в обезличенном виде с сохранением в назначаемой директории;
- 3) возможность редактирования управляющих программ через интерфейс оператора в системах ЧПУ Fanuc, Siemens и АксиОМА Контрол;
- 4) компактность и простота вызова макропрограмм в одну строку, обеспечиваемая встроенными в систему ЧПУ функциями передачи в макропрограмму значений локальных переменных;
- 5) возможность портировать приложение на операционные системы Windows и Android;
- 6) возможность расширения функционала инструментария в плане добавления новых циклов, применимости для новых систем ЧПУ и портирования на другие операционные системы.

Требования к интерфейсу разрабатываемого инструментария:

- 1) группирование технологических переходов типу обработки: установочные макропрограммы, циклы позиционирования, сверления, фрезерования и токарной обработки;
- 2) возможность управлять последовательностью технологических переходов посредством функций перемещения, копирования и удаления;
- 3) графическая визуализация вводимых значений для каждого цикла;

- 4) поддержка определенной последовательности ввода значений каждого цикла: технологические параметры (величина врезания, чистовой припуск) и геометрические параметры (длина, ширина, глубина, диаметр, радиус, угол);
- 5) ограничение по вводу недопустимых значений параметров, путем установки в каждом поле ввода фильтра для операционной системы Windows и вызова одной из встроенных цифровых клавиатур операционной системы Android для избегания некорректной интерпретации введенных значений управляющей программы системой ЧПУ (например, в поле ввода количества отверстий нельзя ввести дробное или отрицательное значение, иначе система ЧПУ отреагирует соответствующим системным предупреждением).
- 6) навигация по полям ввода с использованием системных клавиш «UP», «DOWN», «TAB» и «Enter» для ОС Windows, клавишей «Return» для ОС Android.

## **2.2 Разработка архитектурной модели инструментария**

Формально, концепция инструментария базируется на 3-х уровневой архитектуре (Рисунок 2.1). Уровень пользователя и уровень программного обеспечения формируют систему приложения, уровень системы ЧПУ представлен галереей макропрограмм. Система приложения состоит из графических интерфейсов для операционных систем Windows и Android, которые взаимодействуют с программными модулями через специализированную библиотеку, модуля управления файлами и библиотек управляющих программ, модуля шаблона управляющей программы и каталогом модулей постпроцессирования. Графический интерфейс разработан по аналогии с диалоговым режимом интерфейса оператора системы ЧПУ, имеет четко

структурированный ввод данных и графическое сопровождение; модуль управления файлами управляющих программ и библиотек используется для создания пользовательских директорий хранения вводимой информации; модуль шаблона управляющей программы применяется для построения управляющей программы как строгой последовательности переходов и для редактирования исходных данных каждого перехода; модули постпроцессорирования используются для генерации кода управляющей программы под конкретную систему ЧПУ. Постпроцессор осуществляет последовательный вызов циклов из галереи макропрограмм для каждой из рассматриваемых систем ЧПУ (Fanuc, Siemens, АксиОМА Контрол).

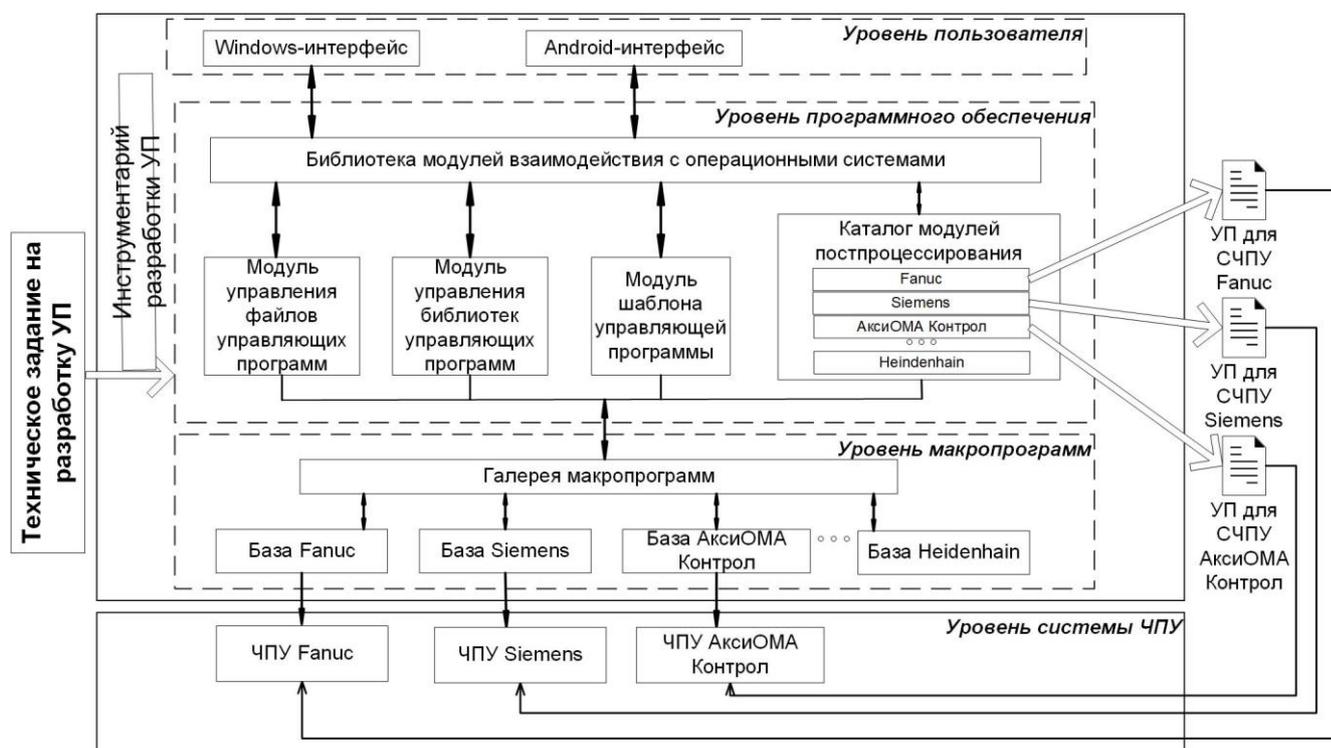


Рисунок 2.1 – Архитектурная модель инструментария

В состав галереи макропрограмм входят базы макропрограмм для систем ЧПУ Fanuc, Siemens, АксиОМА Контрол. Галерея может пополняться макропрограммами для других систем ЧПУ, например Heidenhain при соблюдении специфики разработки макропрограмм на языке высокого уровня и правил структурирования набора макропрограмм в требуемой системы ЧПУ. Невыполнения условий логики разработки макропрограмм или неправильное их

расположении в системе ЧПУ, приведет к некорректной работе управляющей программы [55].

Алгоритм разработки управляющих программ с использованием инструментария разбит на несколько этапов (Рисунок 2.2).

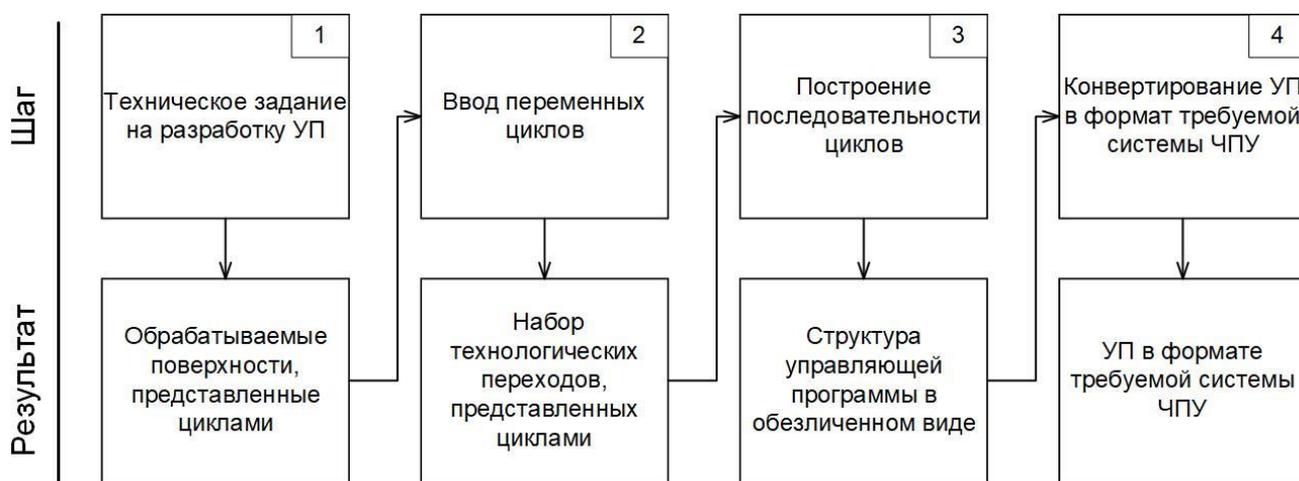


Рисунок 2.2 – Алгоритм разработки управляющих программ с использованием инструментария

На этапе ввода параметров пользователь с использованием графического интерфейса вводит значение переменных для универсальных функций (циклов). На этапе построения последовательности технологических переходов осуществляется вызов функций (циклов) в определенной последовательности, что определяет структуру управляющей программы. На этапе формирования управляющей программы в обезличенном формате получается абстрактное представление управляющей программы, не привязанное к диалекту языка ISO-7bit конкретной системы ЧПУ. Далее, на этапе привязки управляющей программы используется каталог модулей постпроцессирования для систем ЧПУ Fanuc, Siemens и АксиОМА Контрол и осуществляется конвертирование обезличенной управляющей программы в формат управляющей программы для конкретной системы ЧПУ.

Структуру инструментария предполагается проектировать с учетом возможности гибкого расширения системы без негативных последствий для взаимодействия системных модулей [56]. В основе системы лежит базовый класс `PerhodList` – прототип последовательности технологических переходов. Каждый

технологический переход, соответствующей одноименной макропрограмме, представлен отдельным подклассом Cycle, имеющим набор определенных атрибутов и представлен отдельным графическим интерфейсом. Предложенная структура обеспечивает изоляцию каждого перехода от другого, построенную таким образом, что пользовательские интерфейсы технологических переходов не взаимодействуют друг с другом. Добавления нового подкласса или новых атрибутов любого из подклассов не влияет на корректность работы остальных. Расширение базового класса автоматически наследуется каждым переходом управляющей программы через изменение библиотеки модулей постпроцессирования. Редактирование переходов управляющей программы осуществляется параллельным изменением независимых друг от друга атрибутов подклассов переменных макропрограмм.

Изменение атрибута каждого технологического перехода переписывает значение локальной переменной и не влияет на изменение структуры управляющей программы [57]. Формально такое структурирование обеспечивается модулем шаблона управляющей программы, но подразумевает пользовательский контроль за введение значений переменных каждой макропрограммы.

Структура инструментария построена таким образом, что все вычисления траекторий движения исполнительных органов станка производятся внутри циклов с использованием переменных в системе ЧПУ. Инструментарий формирует последовательность вызова макропрограмм в определенном порядке для корректного чтения и последовательной записи глобальных параметров в системе ЧПУ. Формализация технологических переходов представлена в Таблице 2.2.

После переходов Rotate и Positions можно задать неограниченное количество переходов из разделов Drilling и Milling. Переходы из раздела Turning задаются без привязки к переходам Rotate и Positions, так как включают в себя задание опорной точки обработки. Разработка подсистемы приложения производилась в среде Embarcadero RadStudio 10.4.

Таблица 2.2 – Формализация технологических переходов с классификацией по группам

Технологический переход	Описание
Установочная макропрограмма	Класс параметров рабочей зоны и обработки (Main)
Макропрограмма технологического цикла	
Массив позиций	Класс переходов позиционирования (Positions)
Поворот плоскости	Класс перехода поворота плоскости (Rotate)
Сверление	Класс переходов сверления (Drilling)
Нарезание резьбы метчиком	
Фрезерование пазов	Класс переходов фрезерования (Milling)
Фрезерование карманов	
Фрезерование выступов	
Фрезерование резьбы	
Многопроходное точение по заданным точкам	Класс переходов точения (Turning)
Точение канавки	
Точение выточки	
Точение резьбы	
Отрезка детали	

Главный экран приложения представлен 2-мя объектами: ListBox с функцией Drag&Drop для всех Item кроме 1-ого и ReadOnly Memo с защитой выведенного управляющего кода от пользовательских изменений. ListBox имеет необходимый набор инструментов для работы с элементами списка (технологическими переходами): удаление, перемещение, редактирование [58]. На ListBox может размещаться неограниченное количество элементов Item, представленных GridPanelLayout (3x1): имя перехода, ярлык редактирования перехода и ярлык удаления перехода. Каждый прототип технологического перехода представлен своим интерфейсом ввода TabItem [59].

Множество однотипных переходов собраны в TabControl и представлены в виде отдельных вкладок [60]. Каждый TabItem включает в себя GridPanelLayout –

таблицу, где каждая ячейка представлена управляющими элементами 2х типов: Edit для полей ввода и ComboBox для полей выбора [61]. Каждый Edit имеет определенные фильтры ввода каждого значения: номер инструмента, корректора, скорость резания и количество программируемых элементов не могут иметь дробные и отрицательные значения, все относительные значения, такие как: длины, ширины, радиуса, расстояния между точками, углы приращения, припуски на чистовую обработку и величины съема не могут быть отрицательными.

Каждый класс представлен технологическим переходом, представленным макропрограммой. Классы отвечают за последовательность ввода переменных макропрограмм и за их числовые значения. Полями класса в редакторе являются переменные макропрограммы, методами – функции, меняющие значения полей (Рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Диаграмма классов инструментария

### 2.3 Разработка алгоритма работы инструментария

Инструментарий предполагается разработать с использованием независимых друг от друга диалоговых окон – пользовательских интерфейсов [62]. Диалоговый интерфейс инструментария состоит из блока (Main) – диалоговых окон ввода базовых подпрограмм (Workset, Toolset, MCodes EndCycle), блока циклов позиционирования смежных со сверлильными и фрезерными циклами, блока циклов сверления, циклов фрезерования и циклов токарной обработки. На главной странице представлена вся последовательность обработки с возможностью перехода к параметрам каждого технологического перехода для их изменения, возможностью удаления технологического перехода и перемещение внутри последовательности. Ранее введенные технологические параметры для каждого перехода сохраняются в динамической памяти редактора для возможности повторения ранее используемого цикла для исключения повторного ввода геометрии черновой и чистовой обработки одного и того же элемента.

Разработка циклов проводится на языках высокого уровня: для системы ЧПУ Fanuc – язык макросов MacroB, для системы ЧПУ Siemens – язык, аналогичный C#, для системы ЧПУ АксиОМА Контрол – язык, аналогичный ANSIC, что значительно упрощает процесс задания циклов, исключая необходимость промежуточного расчета переменных [63]. Правила записи макропрограмм в память рассматриваемых в работе систем ЧПУ представлены в Таблице 2.3.

Предварительно оговариваются сценарии работы редактора для корректного редактирования управляющей программы в системе ЧПУ: переменные подпрограммы WORKSET записываются в глобальные переменные станка до нового вызова подпрограммы WORKSET. Аналогичным образом работают подпрограммы MCODES и TOOLSET. Если предполагается обработка в контршпинделе, то необходим повторный вызов подпрограмм WORKSET и MCODES для перенастройки системы координат, точки смены инструмента, плоскостей безопасности и управления устройствами электроавтоматики.

Таблица 2.3 – Правила записи макропрограмм в память систем ЧПУ

<b>Правило</b>	<b>Fanuc</b>	<b>Siemens</b>	<b>АксиОМА Контрол</b>
Область хранения	Область макропрограмм O6000-O6300	Dir/Cycles/User cycles	NC/USERCYCLE (необходимо создать папку)
Вызов макропрограммы	Команда немодального вызова G65 P6000-P6300 A... B... Z...	Прямой вызов из управляющей программы Cycle (... , ...)	Прямой вызов из управляющей программы Cycle (... , ...) В начале каждой программы операнд #include "USERCYCLES/ USERCYCLES.c"
Глобальные переменные	R1-R95	#101-#195	\$dPerm [1]-\$dPerm [95]

Если в подпрограммах обработки предполагается использование одного инструмента с определенной позицией и корректором, то TOOLSET можно задавать один раз. После завершения выбранного цикла инструмент будет отходить на плоскость безопасности, а не в точку смены, что позволит оптимизировать ходы и уменьшить время обработки. Это применимо и к токарным циклам – можно запрограммировать обработку одним инструментом нескольких однотипных элементов обработки с различной геометрической конфигурацией.

## **2.4 Разработка пользовательского интерфейса инструментария**

Разработка пользовательского интерфейса инструментария основывается на принципах построения интерфейса диалоговых систем, встроенных в систему ЧПУ, основанных на последовательном вводе информации о технологическом переходе (Рисунок 2.4) [64]. При первом запуске приложения открывается меню

проекта обработки для создания нового проекта или выбора существующих проектов для редактирования. Список проектов, а также исходные данные каждого проекта хранятся в директории «Общие документы/TMNCE». Там же хранятся и файлы со вспомогательными M-кодами, используемыми в управляющей программе.

Интерфейс каждого технологического перехода содержит поля ввода данных геометрии и технологических, а также пояснительную графическую информацию для корректного ввода параметров. Интерфейс формирования технологических переходов представлен последовательностью элементов Edit для задания числовых значений типа Real и элементов ComboBox.

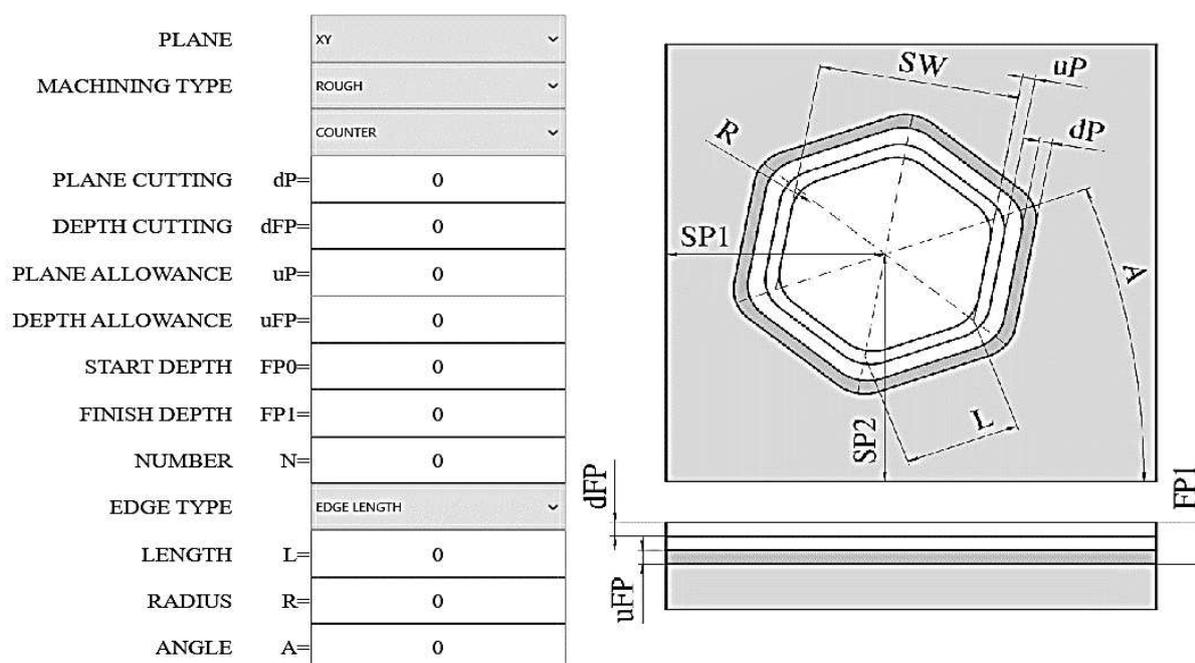


Рисунок 2.4 – Интерфейс ввода параметров цикла фрезерования многоугольного кармана

## 2.5 Разработка методики расширения применимости и расширения опций инструментария

Методика расширения функционала инструментария представлена в нескольких направлениях:

1. дополнение набора поддерживаемых систем ЧПУ другими системами (например, Heidenhain, Mazatrol, FMS-2000 серии);
2. дополнение набора разработанных циклов новыми циклами, работающих по заранее определенной алгоритмической связи с базовыми циклами (например, добавление возможности программирования контурной обработки), расширение стратегий обработки разработанных циклов (например, введение возможности задания высокоскоростной обработки);
3. дополнение возможности портирования на другие операционные системы (например, OS Linux, Mac OS).

Расширение количества систем ЧПУ, на которые можно распространить применимость разработанной методики с использованием инструментария, возможно при условии, что системы предусматривают работу с макросами, глобальными и локальными переменными, а также имеют встроенное средство вычисления сложных арифметических конструкций. Для корректного внедрения новых систем ЧПУ необходима поддержка вызова функций, содержащих не менее 21 локальной переменной [65]. Вызов функции должен осуществляться в одну строку, например, вызов цикла фрезерования многоугольного кармана: MULTIEDGEROCKET (MPKT1, MPKT2 ... MPKT15). В каждой новой системе ЧПУ вычисления опорных точек внутри макропрограмм будет осуществляться по алгоритму, заложенному разработчиками системы с использованием схожего с другими системами, но уникального синтаксиса, а вызов подпрограмм с переменными должен быть одинаков.

Расширение количества циклов предусматривает разработку циклов, имеющих определенный набор переменных (например, зубофрезерование), циклов контурной обработки, имеющих неограниченное количество повторяющихся переменных и разработку специализированных циклов, имеющих неопределенное количество переменных (например, гравирование текста с разным количеством символов). Для разработанных циклов в инструментарии в исходном коде создается специализированный раздел, разработанные циклы представляются

классом с predetermined набором атрибутов, для каждого цикла создается интерфейс ввода и графическая поддержка, наименование цикла прописывается в файле управления навигации инструментария.

Расширение функциональности разработанных циклов осуществляется за счет добавления новых стратегий обработки, таких как спиральное фрезерование или высокоскоростная фрезерная обработка по predetermined трахоидальным траекториям, точение с комбинированным направлением резания (продольно-поперек). Внедрение новых стратегий осуществляется за счет добавления алгоритмов перемещений в структуру подпрограммы обработки. Расширение набора систем ЧПУ, поддерживаемых операционных систем, количества и стратегий циклов механообработки представлено на Рисунке 2.5.

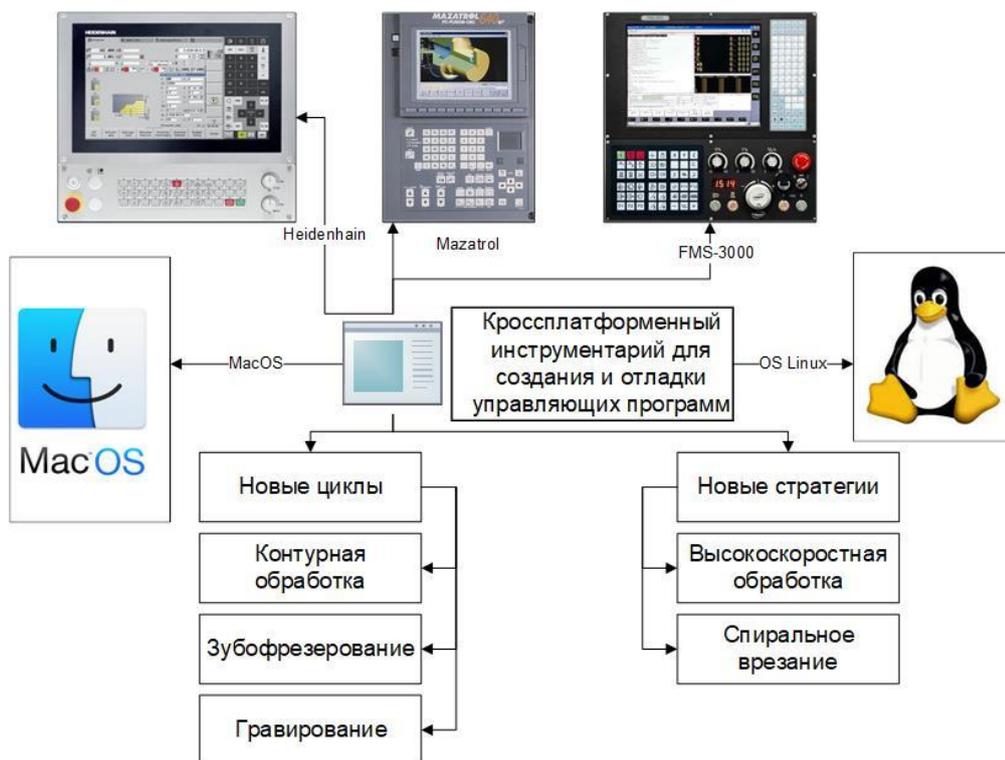


Рисунок 2.5 – Расширение функционала инструментария

Расширение количества операционных систем возможно за счет установки в среду разработки специальных модулей и библиотек для компиляции установочного файла инструментария в необходимый формат (\*.deb для OS Linux, \*.app для MacOS) [66].

## 2.6 Выводы по главе 2

1. На основании выявленных требований к концептуальной модели инструментария разработки управляющих программ наиболее подходящим вариантом реализации программного средства является 3-х уровневая архитектура, отвечающая требованию унификации кода управляющей программы для различных систем ЧПУ.
2. Классовая структура инструментария основана на изолированности каждого технологического перехода относительно друг друга, что позволяет избегать ошибок проектирования управляющей программы в обезличенном виде.
3. Алгоритм работы инструментария, основанный на взаимодействии макропрограмм в специализированной галерее в системе ЧПУ, исключает сценарии некорректной работы управляющей программы.
4. Графический пользовательский интерфейс разработан таким образом, что все переменные каждого технологического перехода вводятся в определенном порядке в форме списка с фильтром ввода для каждой переменной для исключения некорректного ввода данных технологического перехода.

## **Глава 3. Разработка методики программирования с использованием инструментария**

### **3.1 Разработка механизма взаимодействия установочных макропрограмм в системе числового программного управления**

Каждая макропрограмма в системе выполняет определенный блок функций и использует строго заданные глобальные переменные систем ЧПУ, напрямую не влияющие на работу основных и вспомогательных узлов технологического оборудования.

Взаимодействие макропрограмм основано на передаче блоков глобальных переменных в конечный цикл обработки, где предварительно заданные глобальные переменные вступают во взаимодействие с локальными переменными цикла посредством математических, тригонометрических и логических вычислений [67]. Методика подготовки управляющих программ представлена на Рисунке 3.1. Механизм взаимодействия установочных макропрограмм с циклами обработки основан на принципе преобразования локальных переменных сначала в глобальные с дальнейшим использованием глобальных переменных в макропрограммах расчёта с последующим вызовом макропрограмм расчета одна из другой (Рисунок 3.2). Данный принцип позволяет производить обработку элементов различной конфигурации, имеющих общее расположение в плоскости [68].

Разработку методики создания установочных макропрограмм инструментария целесообразно основывать на выявлении основных используемых параметров, определяющих стратегию перемещений режущего инструмента в процессе работы цикла. Классификация параметров базовых циклов управляющей программы представлена на Рисунке 3.3.

В каждой системе ЧПУ магазин режущего инструмента заполняется определенным образом: в системах ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол необходимо

ввести всю информацию об инструменте, в системе ЧПУ Fanuc необходимо указать только радиус режущей кромки и её направление [69].

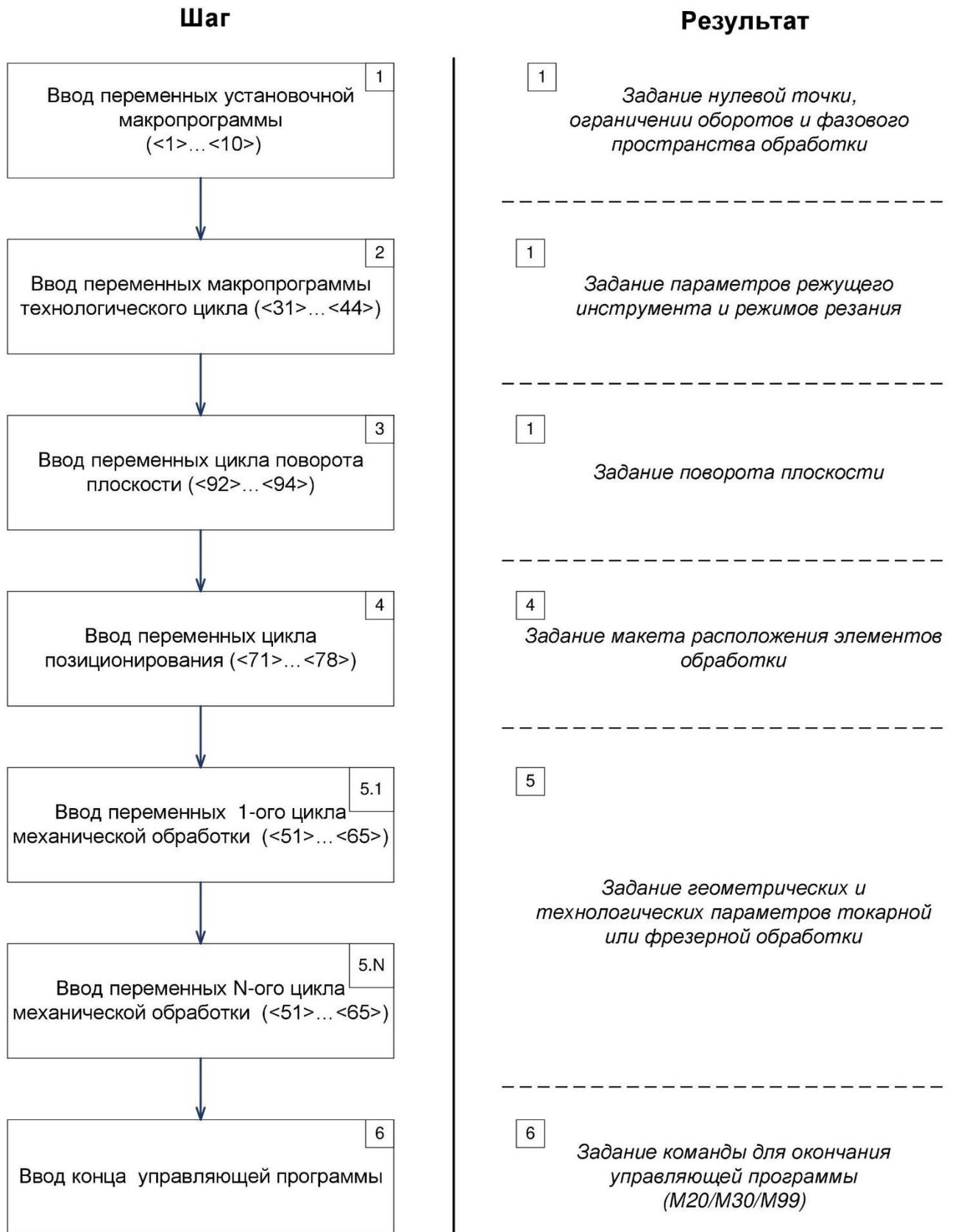


Рисунок 3.1 – Методика подготовки управляющих программ



Рисунок 3.2 – Последовательность вызова макропрограмм



Рисунок 3.3 – Классификация переменных базовых подпрограмм

### 3.2 Разработка установочной макропрограммы

Макропрограммы обработки имеют общие переменные, что позволяет объединить эти переменные в определенный набор вспомогательных, но обязательных в использовании макропрограмм: установочная макропрограмма, установочная макропрограмма технологического цикла и макропрограмма, содержащая информацию о М-кодах [70]. Установочная макропрограмма должна содержать параметры, которые определяют положение нулевой точки заготовки, плоскостей безопасности, точки смены инструмента и максимальной скорости вращения шпинделя (Рисунок 3.4) [71].

В Таблице 3.1 представлена детализация переменных установочной макропрограммы. Изменения переменных можно производить повторным вызовом макропрограммы с последующим перезаписыванием локальных переменных, используемых в макропрограммах обработки.

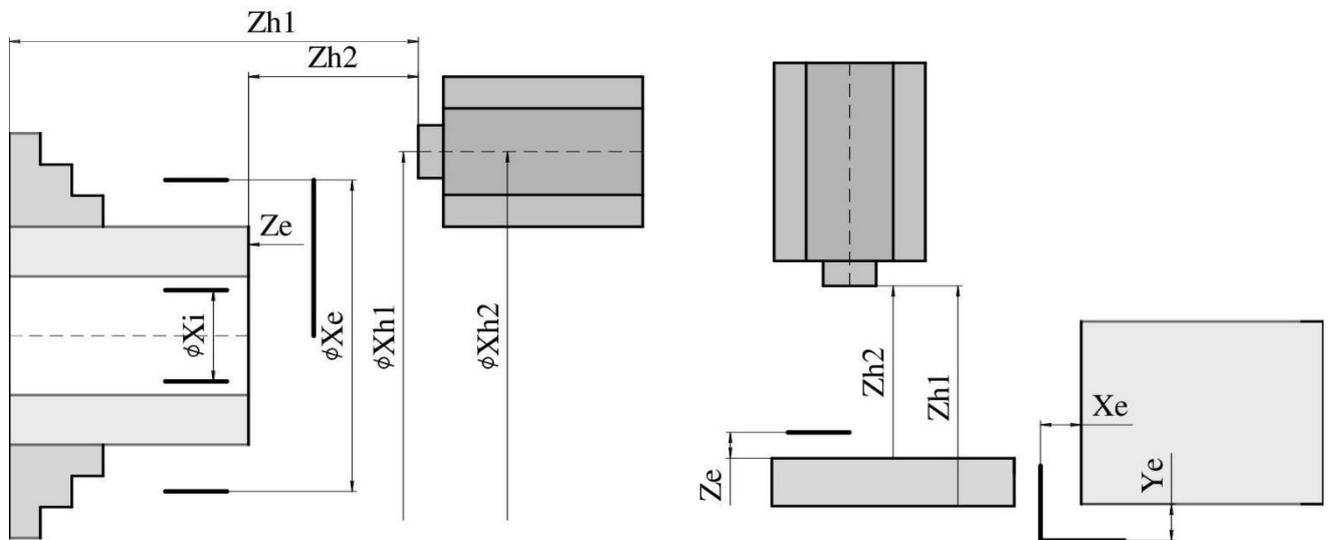


Рисунок 3.4 – Переменные установочной макропрограммы

Вызов установочной макропрограммы для разных систем ЧПУ осуществляется с соблюдением синтаксиса системы:

- для системы ЧПУ Fanuc:  $G65 P6000 A(WS1) B(WS2) C(WS3) D(WS4) E(WS5) F(WS6) H(WS7) I(WS8) J(WS9) K(WS10)$
- для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол:  $WORKSET (WS1, WS2, WS3, WS4, WS5, WS6, WS7, WS8, WS9, WS10)$

Таблица 3.1 – Переменные установочной макропрограммы

Параметр	Обозначение	Переменная цикла	Индексы выбора	Расшифровка индексов
Смещение нулевой точки	-	WS1	0	G54
			1	G55
			2	G56
			3	G57
			4	G58
			5	G59
Максимальная частота вращения шпинделя	Smax	WS2	-	-
Плоскость безопасности по оси X (наружная обработка)	Xe	WS3	-	-
Плоскость безопасности по оси X (внутренняя обработка)	Xi	WS4	-	-
Плоскость безопасности по оси Y	Ye	WS5	-	-
Плоскость безопасности по оси Z	Ze	WS6	-	-
Тип точка смены инструмента	-	WS7	0	координаты станка
			1	координаты заготовки
Координата точки смены инструмента по оси X	Xh	WS8	-	-
Координата точки смены инструмента по оси Y	Yh	WS9	-	-
Координата точки смены инструмента по оси Z	Zh	WS10	-	-

### 3.3 Разработка установочной макропрограммы технологического цикла

Установочная макропрограмма технологического цикла может использоваться совместно с одиночным циклом обработки или с последовательностью циклов в случае отработки одним инструментом. Алгоритм работы макропрограммы представлен на Рисунке 3.5.

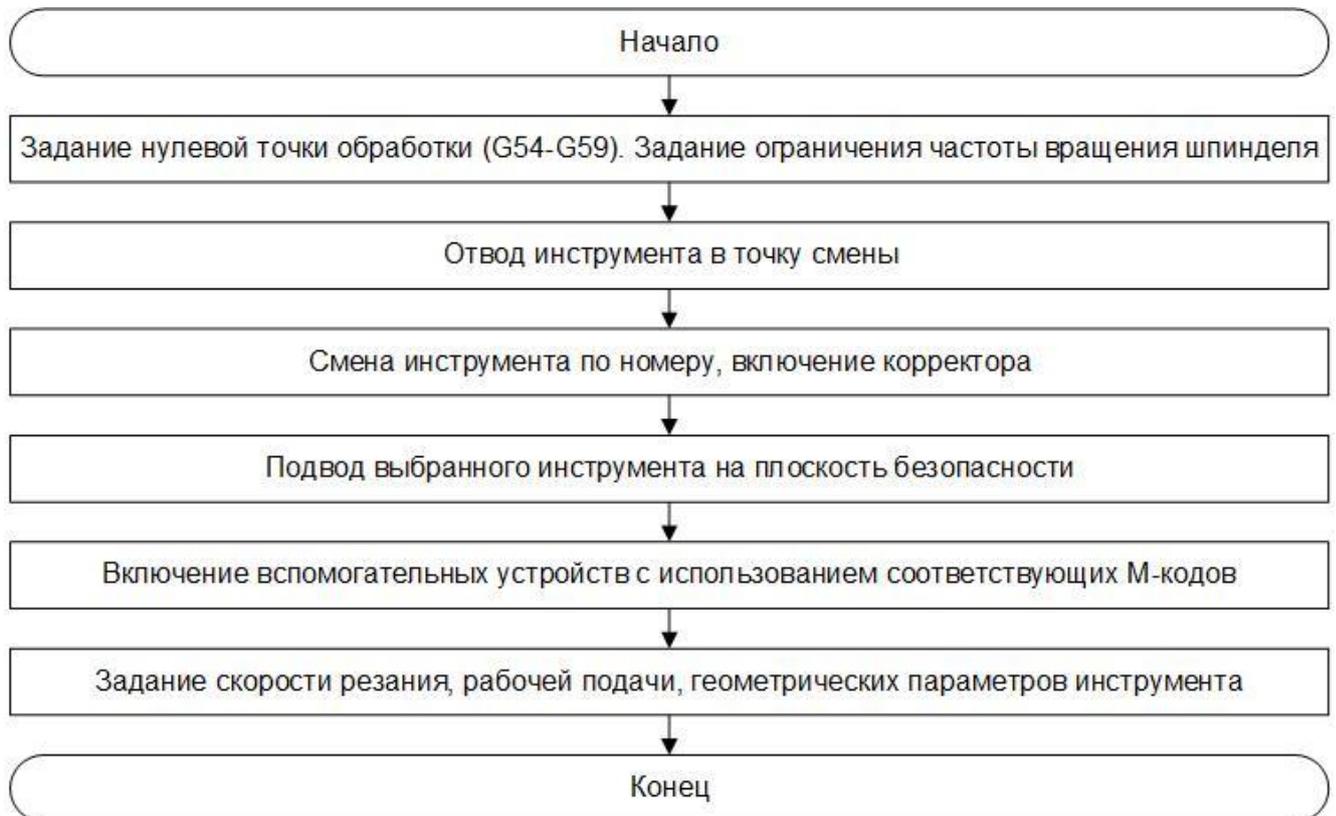


Рисунок 3.5 – Алгоритм работы установочной макропрограммы технологического цикла

Работа подпрограммы реализуется следующим образом:

- 1) выбор системы координат, нулевой точки обработки, отвод инструмента в точку смены;
- 2) вызов инструмента по номеру позиции или по номеру корректора;
- 3) подвод инструмента на плоскость безопасности;
- 4) включение шпинделя с предварительно выбранной частотой в заданном направлении;

- 5) активирование рабочей подачи для последующих циклов;  
 6) активирование устройств электроавтоматики (смазочно-охлаждающая жидкость, стружечный конвейер, уловитель деталей).

Переменные установочной макропрограммы технологического цикла представлены в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Переменные установочной макропрограммы технологического цикла

Параметр	Обозначение	Переменная цикла	Индексы выбора	Расшифровка индексов
Тип операции	-	TS1	0	фрезерование
			1	точение
Номер инструмента	Tt	TS2	-	-
Номер корректора	Td	TS3	-	-
Ширина инструмента / диаметр инструмента	w / d	TS4	-	-
Радиус инструмента / угол инструмента	r / a	TS5	-	-
Размерность рабочей подачи	-	TS6	0	мм/о
			1	мм/мин
Рабочая подача	F	TS7	-	-
Размерность скорости резания	-	TS8	0	м/мин
			1	об/мин
Скорость резания	S	TS9	-	-
Направление вращения шпинделя	-	TS10	0	по часовой
			1	против часовой
Смазочно-охлаждающая жидкость	-	TS11	0	активировать
			1	не активировать
Конвейер удаления стружки	-	TS12	0	активировать
			1	не активировать
Уловитель деталей	-	TS13	0	активировать
			1	не активировать
Тормоз шпинделя	-	TS14	0	активировать
			1	не активировать

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 [72]. Вызов цикла для разных систем ЧПУ осуществляется с соблюдением синтаксиса системы:

- для системы ЧПУ Fanuc:

*G65 P6010 A(TS1) B(TS2) C(TS3) D(TS4) E(TS5) F(TS6) H(TS7) I(TS8) J(TS9) K(TS10)  
M(TS11) Q(TS12) R(TS13) S(TS14)*

- для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол:

*TOOLSET (TS1, TS2, TS3, TS4, TS5, TS6, TS7, TS8, TS9, TS10, TS11, TS12, TS13, TS14)*

### 3.4 Разработка циклов поворота плоскости

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. Пример типовых элементов представлен на Рисунке 3.6.

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 3.7). При повороте происходит пересчет координат точек из системы координат плоскости в систему координат станка (Рисунок 3.8).

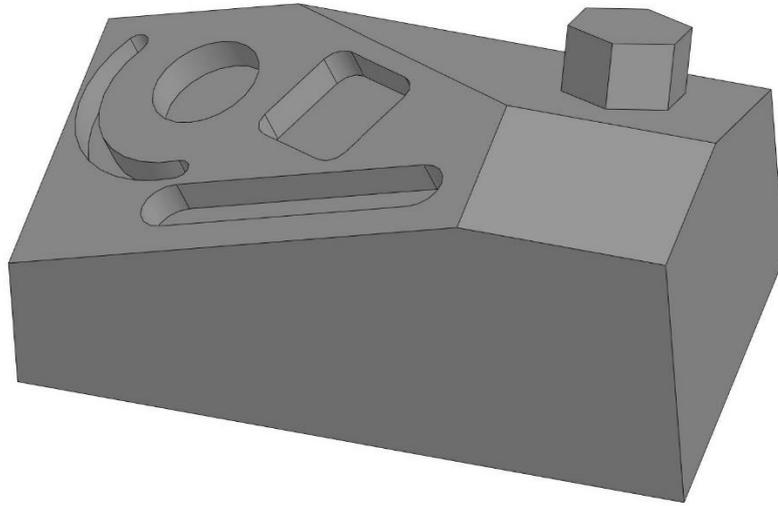


Рисунок 3.6 – Пространственное расположение циклов фрезерования

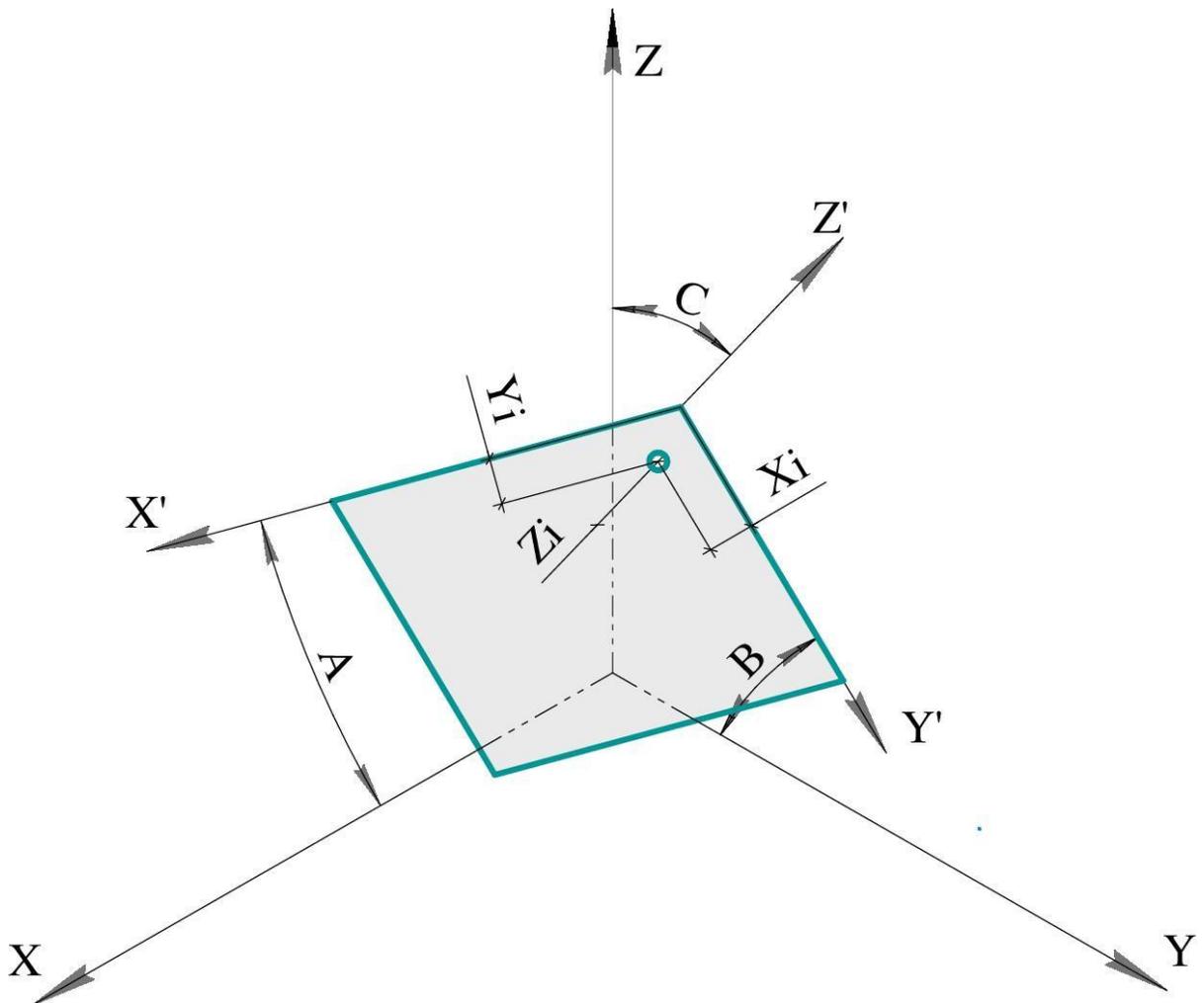


Рисунок 3.7 – Положение точки  $X_i, Y_i, Z_i$  в системе координат плоскости после поворота плоскости вокруг осей абсцисс-ординат-аппликат.

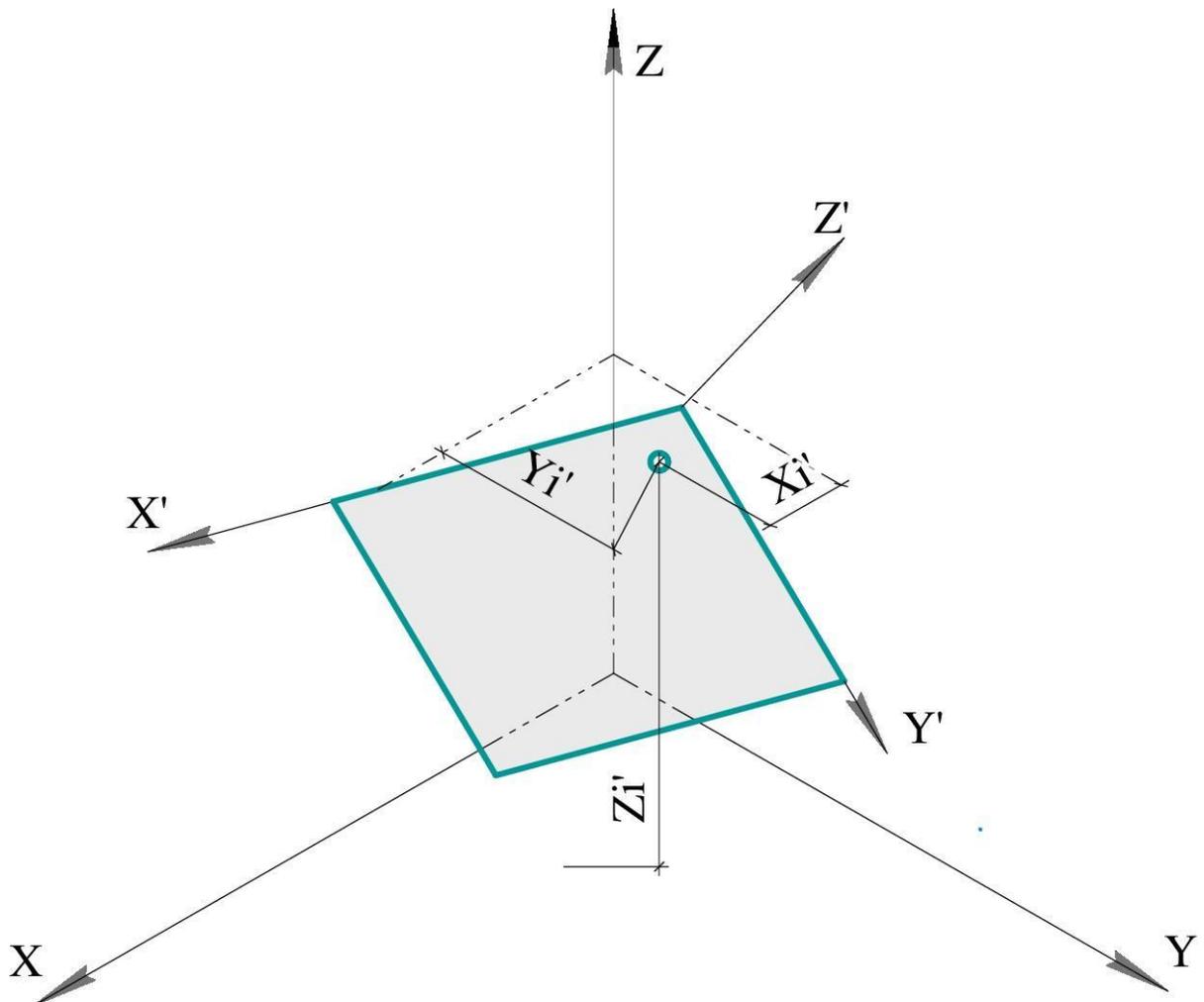


Рисунок 3.8 – Положение точки  $X_i, Y_i, Z_i$  в системе координат станка после поворота плоскости вокруг осей абсцисс-ординат-аппликат

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  $X_i, Y_i, Z_i$ .

**Расчёт координат точек после поворота.** Систематизация переменных поворота плоскости представлена в Таблице 3.3 углами вокруг осей X, Y, Z. В расчете принят поворот вокруг каждой оси в определенной последовательности: 1 – абсцисс, 2 – ординат, 3 – аппликат. Для расчета используется обратные матрицы поворота в трехмерном пространстве, полученная последовательным перемножением обратных матриц поворота вокруг осей Oz, Oy, Ox [76].

Таблица 3.3 – Переменные поворота плоскости вокруг базовых осей станка

Параметр	Обозначение	Переменная цикла
Угол поворота вокруг оси абсцисс	A	ROT1
Угол поворота вокруг оси ординат	B	ROT2
Угол поворота вокруг оси аппликат	C	ROT3

Матрица поворота вокруг оси абсцисс имеет вид:

$$M_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(A) & -\sin(A) \\ 0 & \sin(A) & \cos(A) \end{bmatrix}$$

Матрица поворота вокруг оси ординат имеет вид:

$$M_y = \begin{bmatrix} \cos(B) & 0 & \sin(B) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(B) & 0 & \cos(B) \end{bmatrix}$$

Матрица поворота вокруг оси аппликат имеет вид:

$$M_z = \begin{bmatrix} \cos(C) & -\sin(C) & 0 \\ \sin(C) & \cos(C) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Обратная матрица поворота вокруг оси абсцисс имеет вид:

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

Обратная матрица поворота вокруг оси ординат имеет вид:

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

Обратная матрица поворота вокруг оси аппликат имеет вид:

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

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

- 1) Обратную матрицу  $M_z$  необходимо умножить на матрицу  $N$ , представленную известными точками  $X_i, Y_i, Z_i$ . В результате получится матрица  $P1$  (3.1).

$$P1 = M_z^{-1} \times N = \begin{bmatrix} \frac{\cos(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} & \frac{\sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} & 0 \\ -\frac{\sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} & \frac{\cos(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{X_i \times \cos(C) + Y_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} \\ \frac{Y_i \times \cos(C) - X_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} \\ Z_i \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

- 2) Обратную матрицу  $M_y$  умножить на матрицу  $P1$ , полученную в шаге 1. В результате получится матрица  $P2$  (3.2).

$$\begin{aligned}
 P2 = My^{-1} \times P1 = & \begin{bmatrix} \frac{\cos(B)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} & 0 & \frac{-\sin(B)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{\sin(B)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} & 0 & \frac{\cos(B)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} \end{bmatrix} \times \\
 \begin{bmatrix} \frac{X_i \times \cos(C) + Y_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} \\ \frac{Y_i \times \cos(C) - X_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} \\ Z_i \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} \frac{\cos(B) \times \left( \frac{X_i \times \cos(C) + Y_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} \right) - Z_i \times \sin(B)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} \\ \frac{Y_i \times \cos(C) - X_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} \\ \frac{Z_i \times \cos(B) - \sin(B) \times \left( \frac{X_i \times \cos(C) + Y_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} \right)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} \end{bmatrix} \quad (3.2)
 \end{aligned}$$

3) Обратную матрицу  $Mx$  умножить на матрицу  $P2$ , полученную в шаге 2.

В результате получится матрица  $P3$  (3.3).

$$\begin{aligned}
 P3 = Mx^{-1} \times P2 = & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\cos(A)}{\cos(A)^2 + \sin(A)^2} & \frac{\sin(A)}{\cos(A)^2 + \sin(A)^2} \\ 0 & \frac{-\sin(A)}{\cos(A)^2 + \sin(A)^2} & \frac{\cos(A)}{\cos(A)^2 + \sin(A)^2} \end{bmatrix} \times \\
 \begin{bmatrix} \frac{\cos(B) \times \left( \frac{X_i \times \cos(C) + Y_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} \right) - Z_i \times \sin(B)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} \\ \frac{Y_i \times \cos(C) - X_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} \\ \frac{Z_i \times \cos(B) - \sin(B) \times \left( \frac{X_i \times \cos(C) + Y_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} \right)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} \end{bmatrix} \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

В матрице  $P3$  каждая строка соответствует координате по определенной оси: 1 строка – значение проекции точки по оси абсцисс, 2 строка – значение

проекция точки по оси ординат, 3 строка – значение проекции точки по оси аппликат. Расчет координаты точки  $(X_i', Y_i', Z_i')$ , проецируемой на заданную плоскость имеет вид (3.4 – 3.5):

$$X_i' = \frac{\cos(B) \times \left( \frac{X_i \times \cos(C) + Y_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} \right) - Z_i \times \sin(B)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} \quad (3.4)$$

$$Y_i' = \frac{\sin(A) \times \frac{Z_i \times \cos(B) + \sin(B) \times \left( \frac{X_i \times \cos(C) + Y_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} \right)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} + \cos(A) \times \frac{Y_i \times \cos(C) - X_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2}}{\cos(A)^2 + \sin(A)^2} \quad (3.5)$$

$$Z_i' = \frac{\cos(A) \times \frac{Z_i \times \cos(B) + \sin(B) \times \left( \frac{X_i \times \cos(C) + Y_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2} \right)}{\cos(B)^2 + \sin(B)^2} - \sin(A) \times \frac{Y_i \times \cos(C) - X_i \times \sin(C)}{\cos(C)^2 + \sin(C)^2}}{\cos(A)^2 + \sin(A)^2} \quad (3.6)$$

**Программная реализация способов расчета.** При расчете в тело цикла передаются глобальные переменные с индексами <92>, <93>, <94>, принимающими значения углов А, В, С.

Программная реализация циклов поворота и предварительно повернутой плоскости представлены на Рисунке 3.9.

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 плоскости (Z для XY, Y для ZX, X для YZ), так как значения по

этой координате перестают быть модальными (как правило, при обработке в стандартной плоскости XY перемещение по оси инструмента происходят в отдельном кадре, поэтому значение  $Z_i$  рассчитывается однократно, в отличие от значений перемещений в плоскости  $X_i$  и  $Y_i$ ). 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.



Рисунок 3.9 – Программная реализация пространственной обработки

Вызов цикла задания плоскости через углы поворота осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc:  $G65 P6017 A(ROT1) B(ROT2) C(ROT3)$

- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол: *ROTATE(ROT1, ROT2, ROT3)*;

Для возвращения к обработке в стандартных плоскостях, необходимо обнулить все переменные в повторно вызванном цикле. Вызов цикла с обнуленными значениями осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом

- Для системы ЧПУ Fanuc: *G65 P6017 A0 B0 C0*
- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол: *ROTATE(0, 0, 0)*;

### 3.5 Разработка циклов позиционирования

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 [73]. 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 управляющей программы можно последовательно вызвать до 3-х подпрограмм (характерно для систем ЧПУ Fanuc и АксиОМА Контрол) [74]. 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. Из-за модального использования режима DIAMON (программирование токарной обработки с использованием размером диаметров) происходит 2-кратное увеличение по координате X [75].

На Рисунке 3.10 поясняется использование плоскостей обработки. Расчет координат точек для нестандартных плоскостей представлен в формулах 3.13 и 3.14 (расчет универсальных глобальных переменных систем ЧПУ <81> и <82> в расчетах массивов позиций).

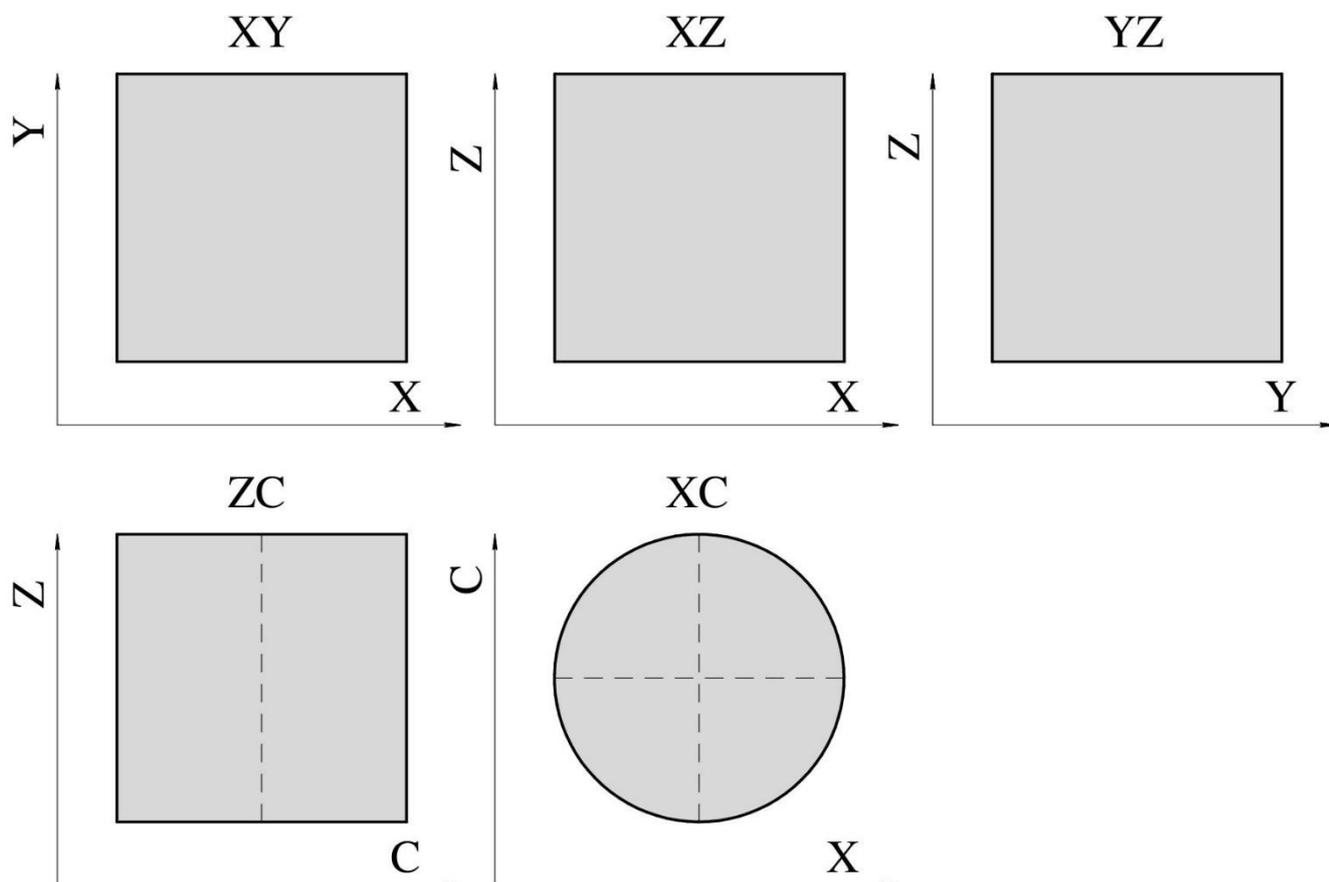


Рисунок 3.10 – Плоскости обработки для расчета координат точек массивов позиций

$$\langle 83 \rangle = 2 * \sqrt{\langle 81 \rangle^2 + \langle 82 \rangle^2} \quad (3.13)$$

$$\langle 84 \rangle = \sqrt{\langle 81 \rangle^2 + \langle 82 \rangle^2} \quad (3.14)$$

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.

При выборе одного из массивов переменная <70> принимает определенные значения, влияющие на выбор макропрограммы расчета координат из цикла обработки. Значение переменной представлены в Таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Значение вариативность переменной <70>

<b>Массив позиционирования</b>	<b>Значение переменной &lt;70&gt;</b>
Одна позиция	0
Линия	1
Рамка	2
Сетка	3
Окружность	4
Дуга	5
Многоугольник	6

**Массив «Одна позиция»** предполагает расположение только одного элемента, закоординированного по центру. Переменные массива – координата по оси абсцисс SP1 и по оси ординат SP2.

**Массив позиций «Линия»** предполагает расположение нескольких элементов, расположенных на линии под определенным углом к горизонтальной оси с одинаковым межцентровым расстоянием. Переменные массива – координата 1-ой позиции по оси абсцисс SP1 и по оси ординат SP2, количество элементов N,

расстояние между позициями  $L$  и угол между линией и осью абсцисс  $A$  (Таблица 3.5, Рисунок 3.11). Расчет каждой координаты цикла осуществляется с использованием счетчика количества позиций. Значения координат представлены в виде глобальных переменных систем ЧПУ  $\langle 81 \rangle$  и  $\langle 82 \rangle$  (Рисунок 3.12).

Таблица 3.5 – Переменные массива «Линия»

Переменная	Обозначение	Переменная цикла
Координата 1 поз. по оси абсцисс	SP1	POS1
Координата 1 поз. по оси ординат	SP2	POS2
Количество позиций	N	POS3
Расстояние между позициями	L	POS4
Начальный угол к оси абсцисс	A	POS5

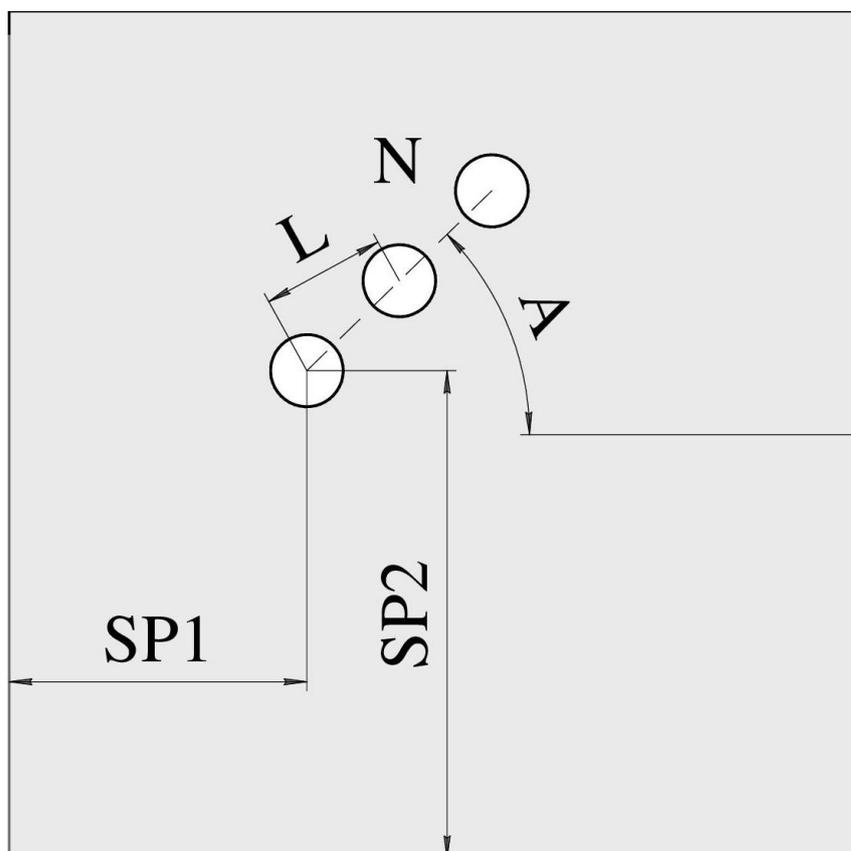


Рисунок 3.11 – Массив позиций «Линия»



Рисунок 3.12 – Расчет координат точек массива позиций «Линия»

**Массив позиций «Рамка»** предполагает расположение нескольких элементов, расположенных на линиях, по геометрии схожих с рамкой, расположенной под определенным углом к осям абсцисс и ординат с одинаковым межцентровым расстоянием элементов.

Переменные массива – координата 1-ой позиции по оси абсцисс SP1 и по оси ординат SP2, количество элементов в строке N1, количество элементов в столбце N2, расстояние между позициями в строке L1, расстояние между позициями в столбце L2, угол между строкой и осью абсцисс A1 и угол между столбцом и осью ординат A2 (Таблица 3.6, Рисунок 3.13).

Расчет каждой координаты цикла осуществляется с использованием нескольких последовательно включаемых счетчиков количества позиций. Значения координат представлены в виде глобальных переменных систем ЧПУ <81> и <82> (Рисунок 3.14).

Таблица 3.6 – Переменные массива «Рамка»

Переменная	Обозначение	Переменная цикла
Координата 1 поз. по оси абсцисс	SP1	POS1
Координата 1 поз. по оси ординат	SP2	POS2
Количество позиций в строке	N1	POS3
Количество позиций в столбце	N2	POS4
Расстояние между позициями в строке	L1	POS5
Расстояние между позициями в столбце	L2	POS6
Начальный угол по оси абсцисс	A1	POS7
Начальный угол по оси ординат	A2	POS8

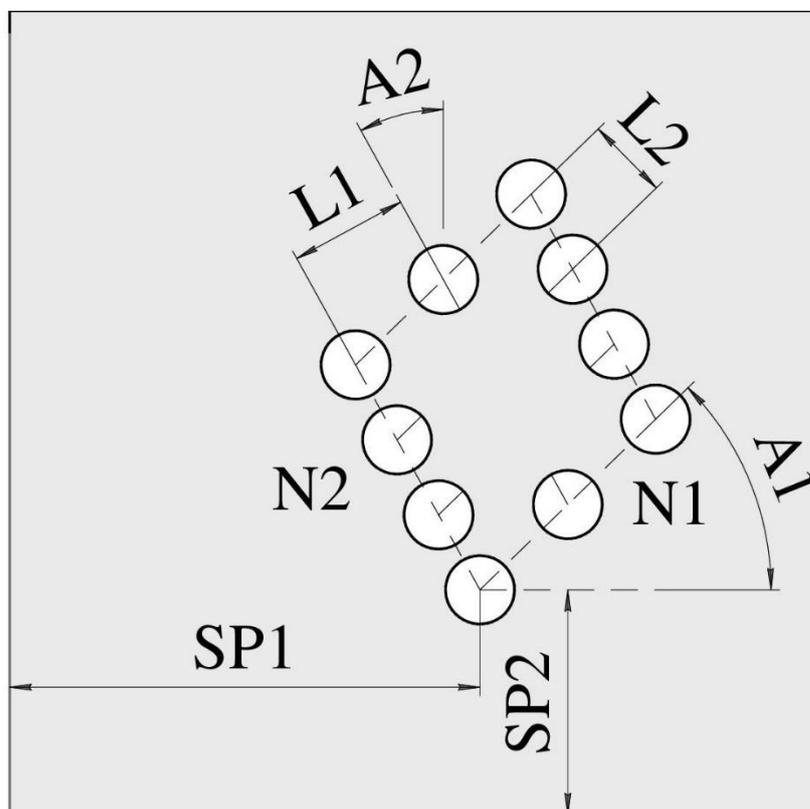


Рисунок 3.13 – Массив позиций «Рамка»

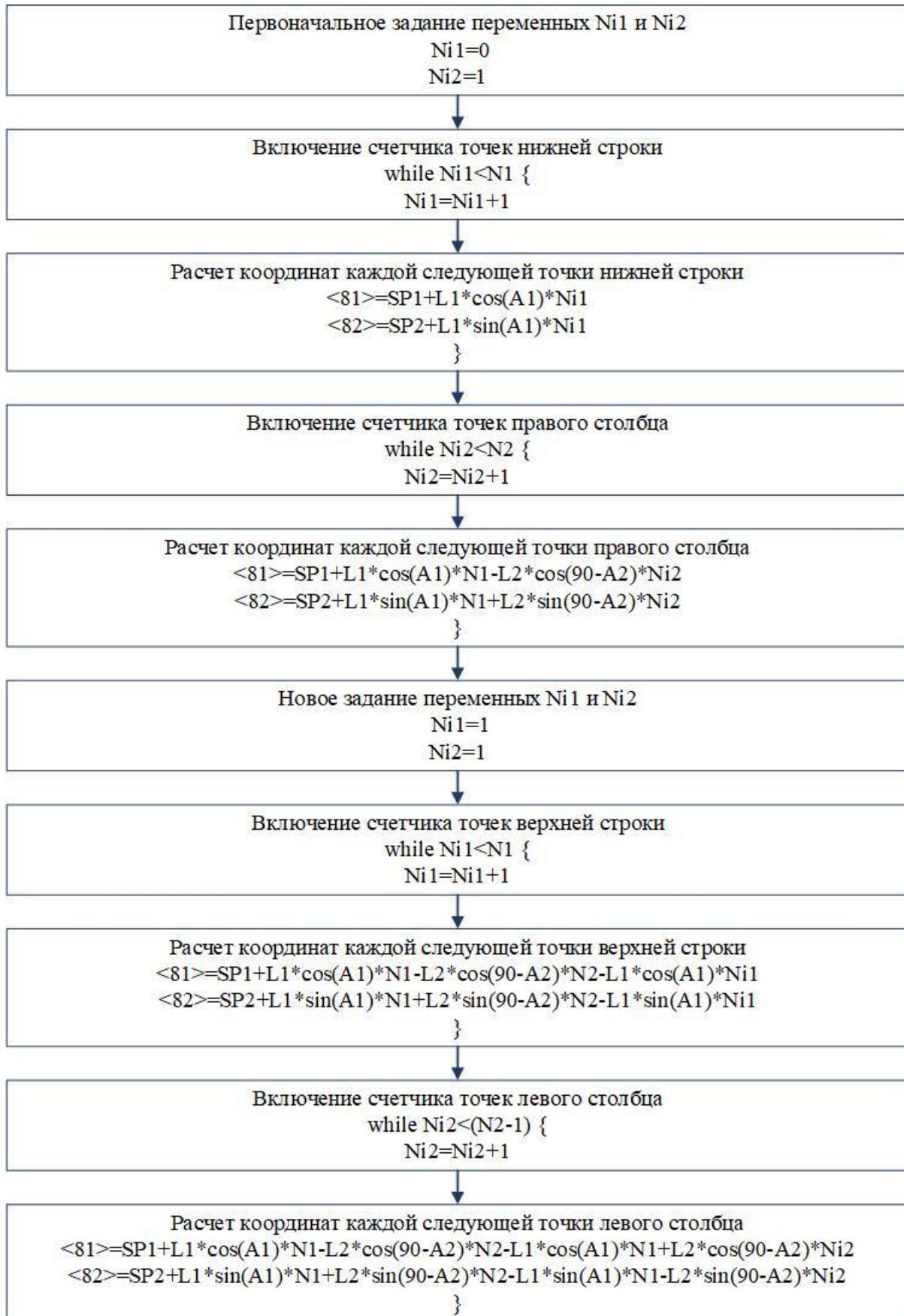


Рисунок 3.14 – Расчет координат точек массива позиций «Рамка»

**Массив позиций «Сетка»** предполагает расположение нескольких элементов, расположенных на линиях, по геометрии схожих с сеткой, расположенной под определенным углом к осям абсцисс и ординат с одинаковым межцентровым расстоянием элементов (Рисунок 3.15).

Переменные массива эквивалентны переменным массива «Рамка». Расчет каждой координаты цикла осуществляется с использованием нескольких счетчиков количества позиций, включаемых один в другой. Значения координат представлены в виде глобальных переменных систем ЧПУ <81> и <82> (Рисунок 3.16).

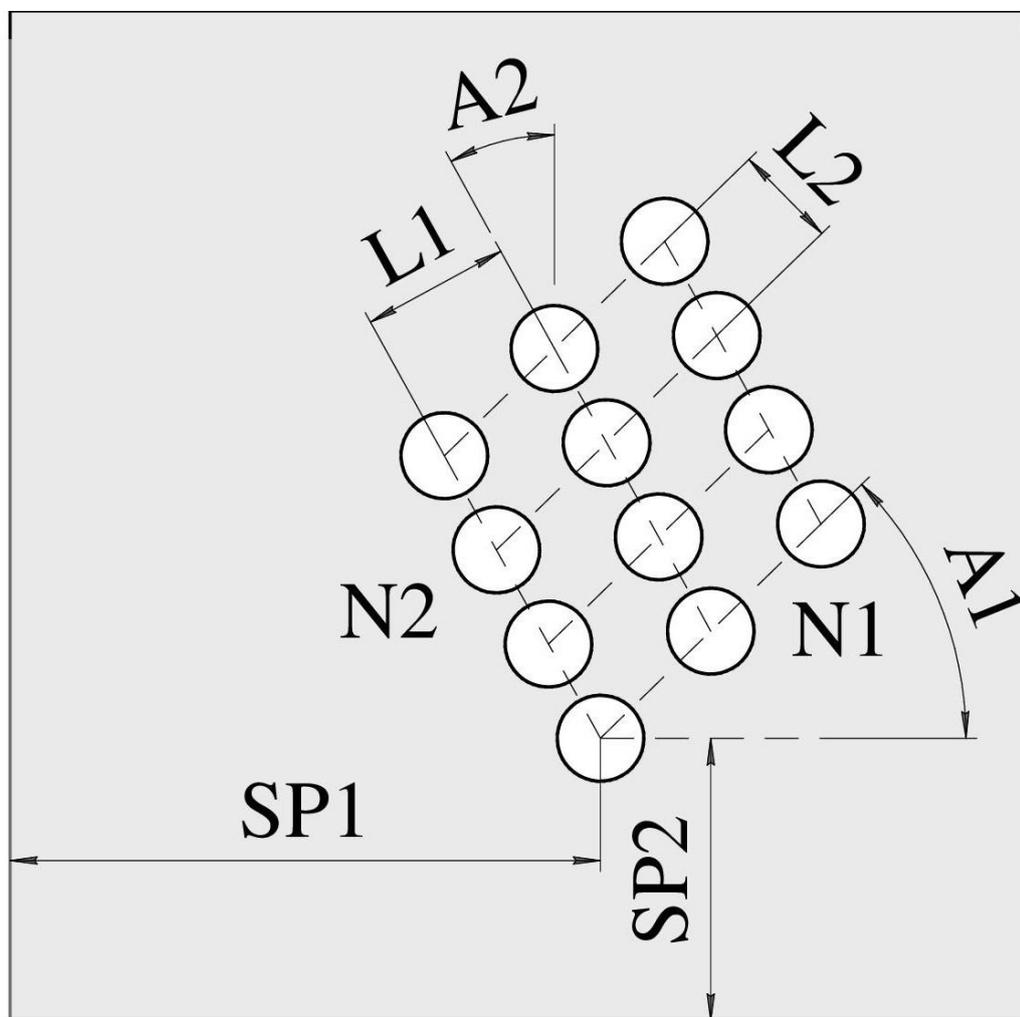


Рисунок 3.15 – Массив позиций «Сетка»

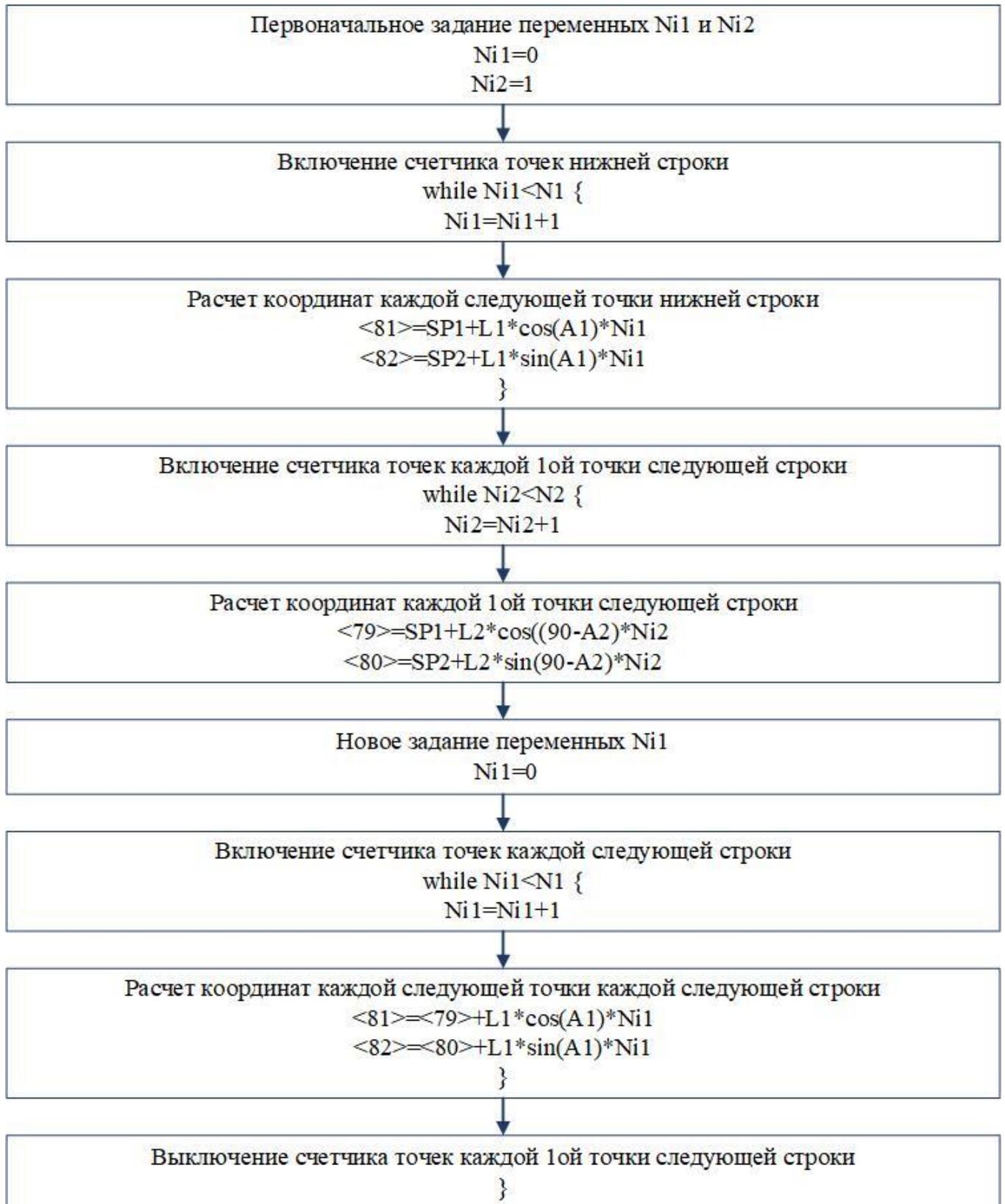


Рисунок 3.16 – Расчет координат точек массива позиций «Сетка»

**Массив позиций «Окружность»** предполагает расположение элементов, расположенных на окружности на одинаковом угловом расстоянии друг от друга под определенным углом первой позиции к оси абсцисс. Переменные массива – координата центра окружности по оси абсцисс SP1 и по оси ординат SP2, количество элементов N, начальный угол к оси абсцисс A0, радиус окружности R (Таблица 3.7, Рисунок 3.18). Расчет каждой координаты цикла осуществляется с использованием счетчика количества позиций. Значения координат представлены в виде глобальных переменных систем ЧПУ <81> и <82> (Рисунок 3.17).

Таблица 3.7 – Переменные массива «Окружность»

Переменная	Обозначение	Переменная цикла
Координата центра окружности по оси абсцисс	SP1	POS1
Координата центра окружности по оси ординат	SP2	POS2
Количество позиций	N	POS3
Начальный угол к оси абсцисс	A0	POS4
Радиус окружности	R	POS5

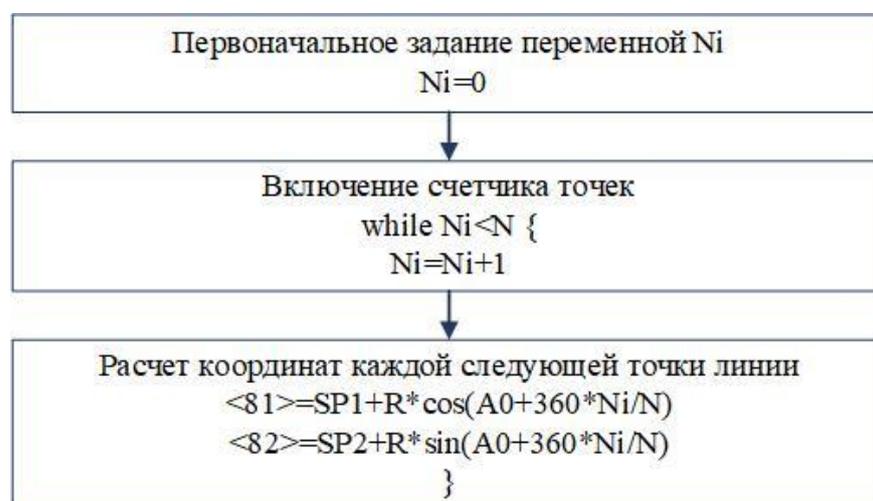


Рисунок 3.17 – Расчет координат точек массива позиций «Окружность»

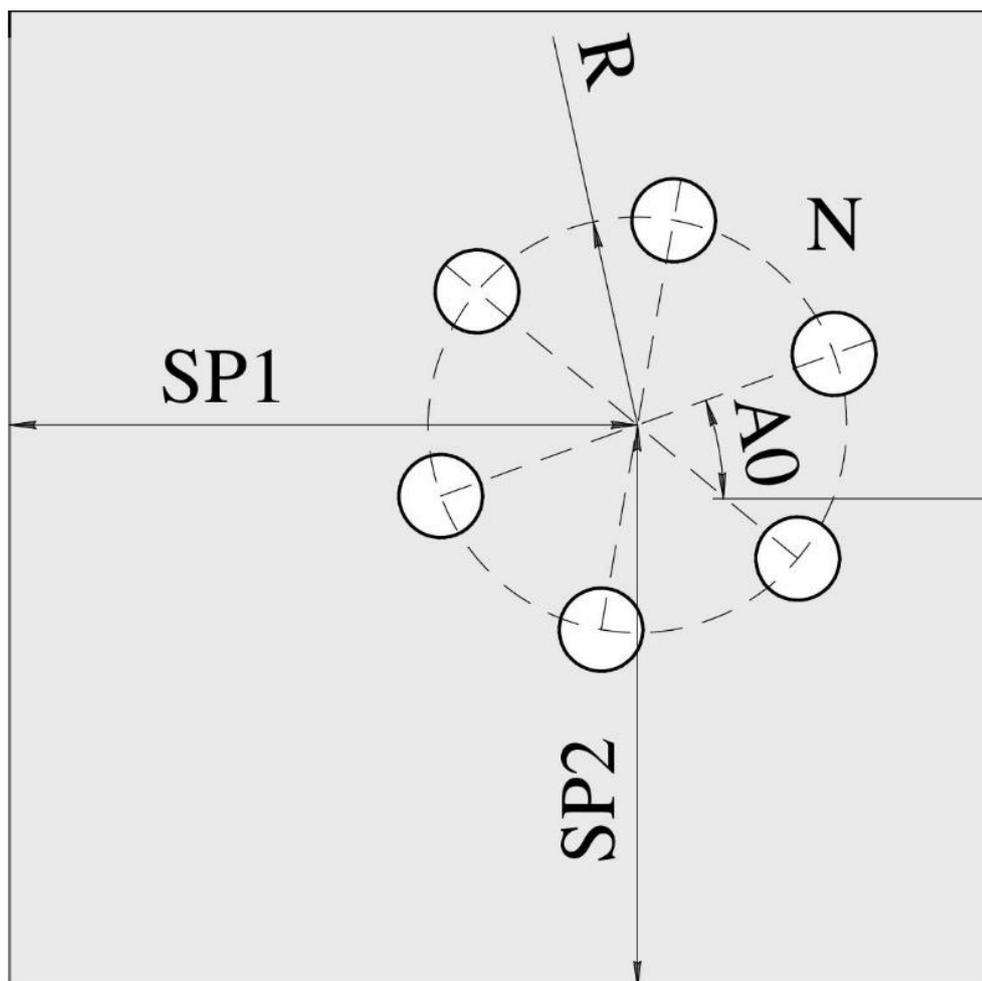


Рисунок 3.18 – Массив позиций «Окружность»

**Массив позиций «Дуга»** предполагает расположение элементов, расположенных на окружности на заданном угловом расстоянии друг от друга под определенным углом первой позиции к оси абсцисс.

Переменные массива – координата центра окружности по оси абсцисс  $SP1$  и по оси ординат  $SP2$ , количество элементов  $N$ , начальный угол к оси абсцисс  $A0$ , угол между позициями  $A1$ , радиус окружности  $R$  (Таблица 3.8, Рисунок 3.19).

Расчет каждой координаты цикла осуществляется с использованием счетчика количества позиций. Значения координат представлены в виде глобальных переменных систем ЧПУ <81> и <82> (Рисунок 3.20).

Таблица 3.8 – Переменные массива «Дуга»

Переменная	Обозначение	Переменная цикла
Координата центра окружности по оси абсцисс	SP1	POS1
Координата центра окружности по оси ординат	SP2	POS2
Количество позиций	N	POS3
Начальный угол к оси абсцисс	A0	POS4
Угол приращения	A1	POS5
Радиус окружности	R	POS6

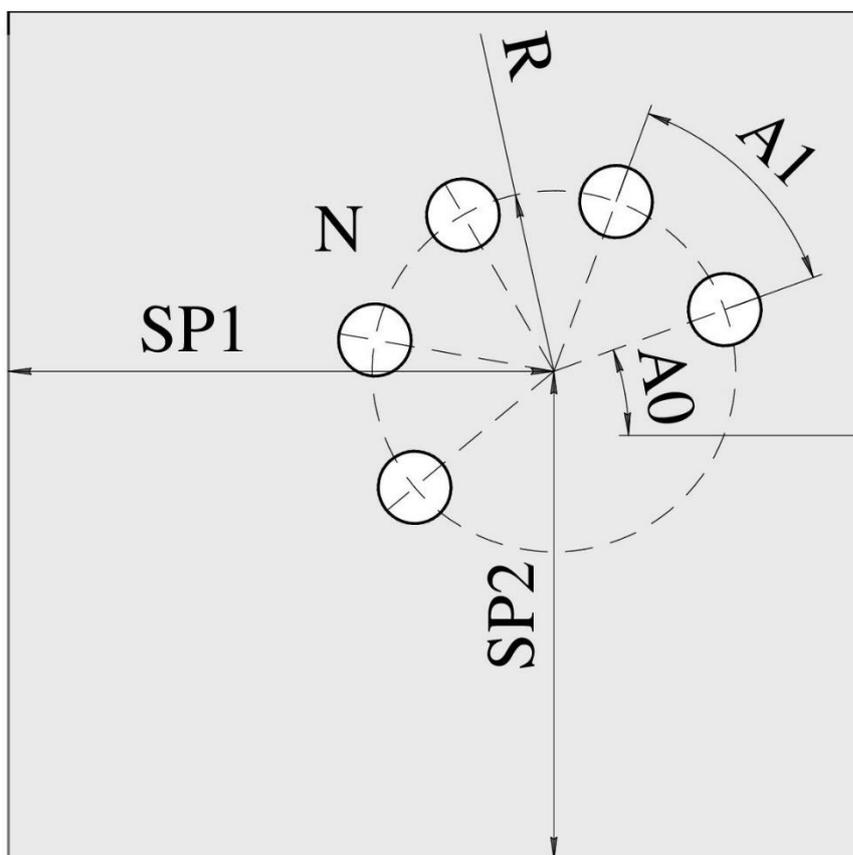


Рисунок 3.19 – Массив позиций «Дуга»



Рисунок 3.20 – Расчет координат точек массива позиций «Дуга»

**Массив позиций «Многоугольник»** предполагает расположение элементов, расположенных на сторонах равностороннего многоугольника, наклоненного под определенным углом к оси абсцисс. Переменные массива – координата центра описанной окружности по оси абсцисс SP1 и по оси ординат SP2, количество сторон *Nedges*, тип задания габаритного размера, длина грани L (или размер «под ключ» SW), количество элементов на стороне N, начальный угол к оси абсцисс A (Таблица 3.9, Рисунок 3.21). Расчет каждой координаты цикла осуществляется с использованием счетчика количества позиций. Значения координат представлены в виде глобальных переменных систем ЧПУ <81> и <82> (Рисунок 3.22).

Расчет по типу задания габаритного размера «под ключ» возможен, только при условии, что количество сторон четное и не менее 4-х. Расчет координат позиций выполнен с использованием длины стороны, поэтому при задании размера под ключ, вначале производится расчет длины стороны L (формула 3.15). Расчет начинается со 2ой точки нижней стороны многоугольника.

$$L = \frac{SW}{\tan\left(90 \cdot \frac{Nedges-2}{Nedges}\right)} \quad (3.15)$$

Таблица 3.9 – Переменные массива «Многоугольник»

Переменная	Обозначение	Переменная цикла
Координата центра описанной окружности по оси абсцисс	SP1	POS1
Координата центра описанной окружности по оси ординат	SP2	POS2
Количество сторон	M	POS3
Тип задания габаритного размера	-	POS4
Габаритный размер	L (SW)	POS5
Количество позиций на стороне	N	POS6
Начальный угол к оси абсцисс	A	POS7

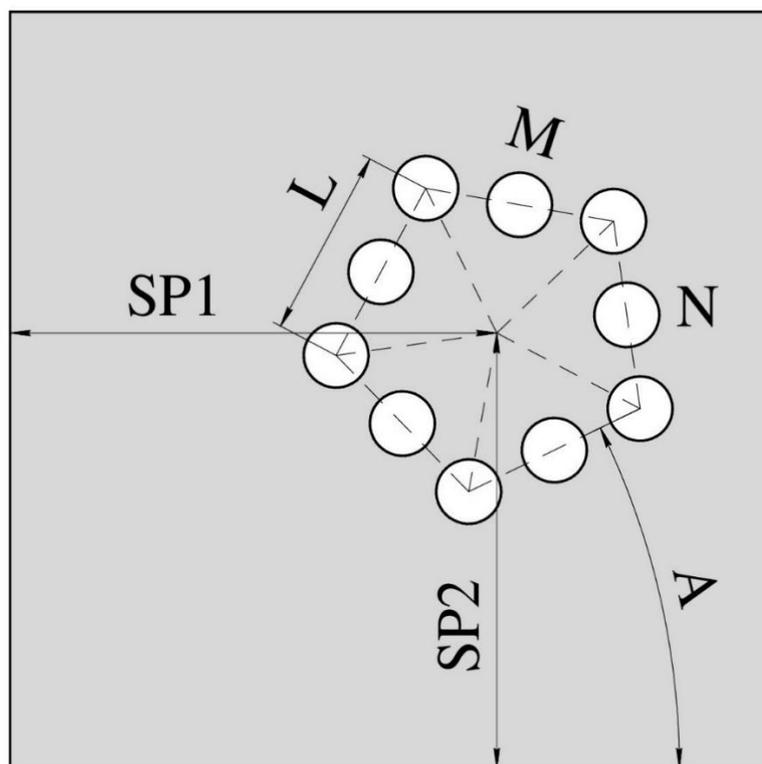


Рисунок 3.21 – Массив позиций «Многоугольник»

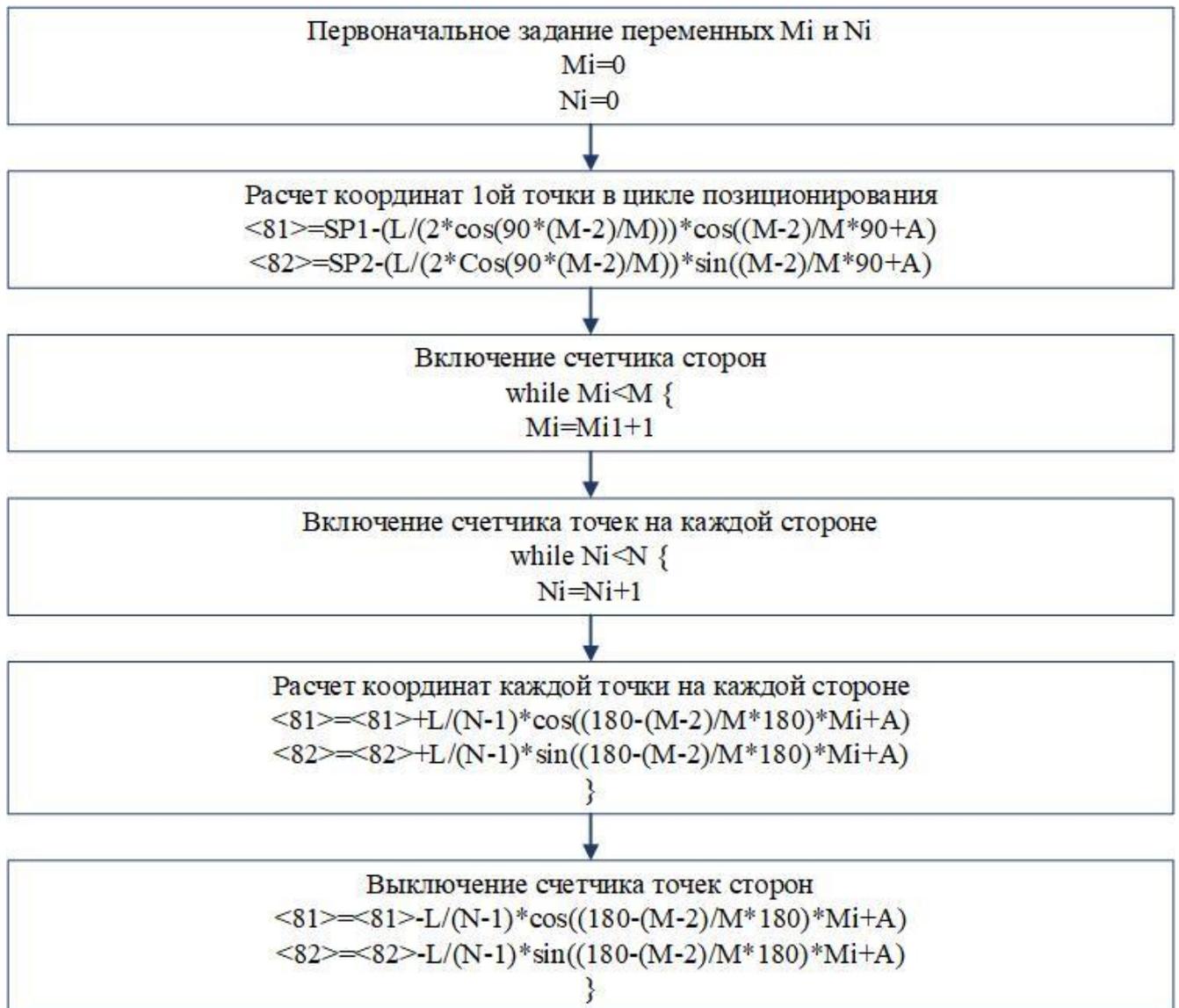


Рисунок 3.22 – Расчет координат точек массива позиций «Многоугольник»

### 3.6 Выводы по главе 3

1. Разработанный механизм взаимодействия макропрограмм и циклов в системе числового программного управления, основанный на принципе многократного вложения подпрограмм, позволяет производить обработку элементов различной конфигурации, имеющих общее расположение в плоскости.

2. На основе разработанного механизма взаимодействия макропрограмм в системе ЧПУ разработаны специализированные макропрограммы для исключения дублирования повторяющихся установочных переменных в каждом технологическом переходе управляющей программы.
3. Разработанный цикл поворота плоскости, при активации которого ось инструмента соответствует оси вектора нормали к обрабатываемой плоскости, позволяет производить обработку с одновременным использованием 3-х осей на наклонных поверхностях на вертикально-фрезерных станках, имеющих специализированную жестко фиксируемую поворотную головку на шпинделе.
4. Разработанные циклы позиционирования, представленные массивами точек с математическими моделями расчета координат, позволяют производить многопозиционную последовательную обработку различных фрезерных элементов во всех возможных плоскостях, используемых на фрезерных и токарно-фрезерных станках с ЧПУ.

## **Глава 4. Разработка циклов типовых технологических переходов механической обработки на токарно-фрезерных и фрезерных станках с ЧПУ**

### **4.1 Методика создания циклов**

Неотъемлемым атрибутом современных систем ЧПУ и САМ-систем являются постоянные циклы, реализующие типовые технологические переходы, такие как обработка отверстий разных конфигураций, канавок, выточек и фасок, контурное точение и фрезерование и т.п., а также циклы расположения отверстий, канавок и др. Циклы позволяют значительно сократить время программирования систем ЧПУ. Однако предприятия на практике сталкиваются с некоторыми проблемами, которые снижают эффективность применения циклов [76].

Во-первых, системы ЧПУ разных производителей (Fanuc, Siemens, АксиОМА Контрол) имеют специфичные наборы параметров для программирования циклов. Это обстоятельство делает невозможным использование управляющих программ, разработанных для одних систем ЧПУ в других системах ЧПУ, тогда как такая потребность в производственных условиях возникает в связи с текущей загрузкой или ремонтом оборудования [77].

Во-вторых, современные производственные условия таковы, что на цеховом уровне требуются универсальные решения подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ токарной и фрезерной групп, позволяющие технологам-программистам использовать в работе не только настольную операционную систему Windows, но и мобильную операционную систему Android. Это позволит ускорить процесс внедрения управляющих программ в производство за счет универсализации технических средств подготовки управляющих программ.

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 [78]. Сравнение стандартных циклов рассматриваемых систем ЧПУ и разработанных циклов для работы инструментария представлено в Таблице 4.1. В соответствии с руководствами по программированию систем ЧПУ Fanuc, Siemens, АксиОМА Контрол, каждый из рассмотренных циклов использует различное количество и содержание геометрических и технологических параметров, специфичный способ задания параметров при вызове цикла, а также различную логику перемещений режущего инструмента при работе цикла [79].

Нет чёткой стандартизации параметров исследуемых циклов: для системы ЧПУ Fanuc, Siemens параметры конечных точек геометрии обрабатываемой детали могут задаваться как в относительных, так и в абсолютных величинах, а для системы ЧПУ АксиОМА Контрол только в относительных.

Вызов циклов в системе ЧПУ Fanuc осуществляется с использованием G-кодов и параметров A-Z, в системе ЧПУ Siemens с использованием функции CYCLE, в системе ЧПУ АксиОМА Контрол с использованием G-кодов и Q-параметров [80]. 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 [81];
- циклы обработки приводным инструментом, используемые как при токарно-фрезерной (в плоскостях XC, ZC), так и при фрезерной обработке (в плоскостях XY, XZ, YZ): циклы позиционирования, сверления, нарезания резьбы метчиком, фрезерования продольного и кольцевого пазов, прямоугольных, круглых и многоугольных выступов, фрезерование резьбы [82].

Таблица 4.1. – Сравнение стандартных и разработанных циклов механообработки

<b>Разработанный цикл</b>	<b>Аналогичный цикл системы ЧПУ Fanuc</b>	<b>Аналогичный цикл системы ЧПУ Siemens</b>	<b>Аналогичный цикл системы ЧПУ АксиОМА Контрол</b>
Установочная макропрограмма	-	Workpiece	-
Макропрограмма технологического цикла	-	-	-
Многопроходное точение	G71	Cycle95	-
Точение канавки	G75, G74	Cycle93	G288, G289
Точение выточки	-	-	G281
Точение резьбы	G76	Cycle97	G276
Отрезка	-	Cycle92	-
Массив «Одна позиция»	-	Cycle802	-
Массив «Линия»	-	Holes1	-
Массив «Рамка»	-	Cycle801	-
Массив «Сетка»	-	Cycle801	-
Массив «Окружность»	-	Holes2	-
Массив «Дуга»	-	Holes2	-
Массив «Многоугольник»	-	-	-
Сверление отверстий	G83	Cycle83	G83
Нарезание резьбы метчиком	G84	Cycle84	-
Продольный паз	-	Slot1	G388
Кольцевой паз	-	Slot2	-
Прямоугольный карман	-	Pocket3	G387
Круглый карман	-	Pocket4	G389
Многоугольный карман	-	-	-
Прямоугольный выступ	-	Cycle76	-
Круглый выступ	-	Cycle77	-
Многоугольный выступ	-	Cycle79	-
Фрезерование резьбы	-	Cycle70	-

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 TOOLSET (диаметр фрезы/сверла, угол сверла/метчика, радиус и ширина пластины). 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 не зависимо от заданной чистоты обрабатываемой поверхности задается проход по конечным точкам элемента с припуском на чистовую обработку. В отличие от систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол, где проход в черновом цикле по всем точкам отсутствует, в разработанных макропрограммах обработки (Cycles) последний проход по точкам с припуском под чистовую обработку позволяет сглаживать предварительную траекторию для случаев, когда между черновой и чистовой операциями необходимо выполнить дополнительную операцию (термическую, гальваническую, малярную, слесарную или др.) [83].

## 4.2 Циклы токарной обработки

Для сокращения длины управляющей программы токарной обработки, макропрограммы обработки одним инструментом с одним корректором можно

вызывать в неограниченном количестве после макропрограммы TOOLSET. Макропрограммы токарной обработки позволяет вести резание как во 2-ом (+X-Z), так и в 1-ом квадранте (+X+Z), что актуально для токарных станков, имеющих контр-шпиндель. Алгоритм работы циклов токарной обработки представлен на Рисунке 4.1.

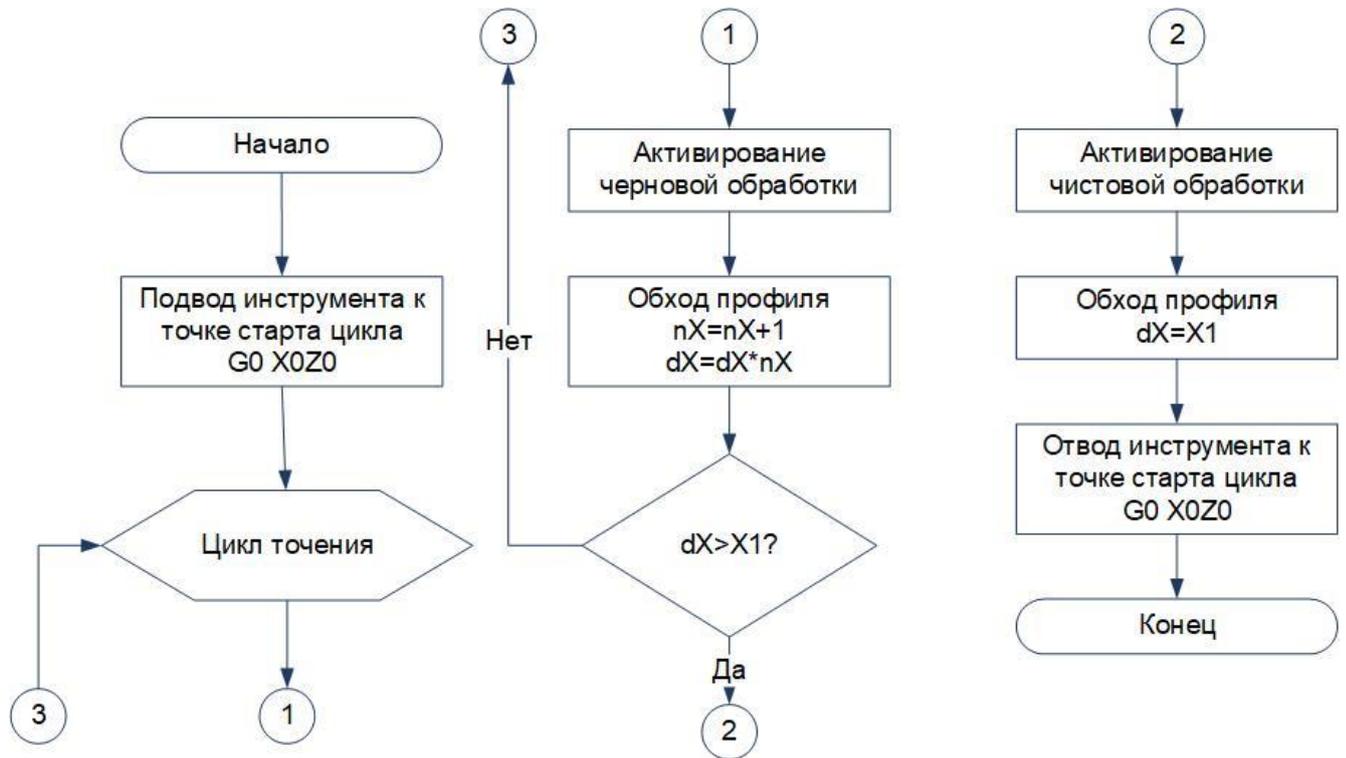


Рисунок 4.1 – Обобщенный алгоритм работы циклов точения

Алгоритм работы циклов предусматривает выполнение следующей последовательности:

- 1) перемещение инструмента с подачей ускоренного перемещения G0 в точку старта цикла X0Z0. В зависимости от расположения обработки (снаружи или внутри) и направлении резания (+Z или -Z), инструмент перемещается на рабочей подаче вниз или вверх, вправо или влево от точки старта цикла на величину врезания dX или dZ;
- 2) врезание инструмента с рабочей подачей G1 до достижения заданных величин X1 и Z1, с притуплением радиусами или фасками;

- 3) активирование чистового прохода параллельно всему контуру с учетом припуска на чистовую обработку  $uX$  и  $uZ$  с рабочей подачей  $G1$ . Чистовой припуск в чистовом проходе необходим для технологических процессов, включающих в себя немеханические операции (термообработка, покрытие, покраска) для уменьшения времени разработки новой управляющей программы с использованием уже заданного цикла с другим значением  $uX$  и  $uZ$ ;
- 4) отвод инструмента в точку старта цикла  $X0Z0$  по каждой из осей или по двум осям одновременно в зависимости от обработки с рабочей подачей  $G1$ ;

**Цикл многопроходного точения по заданным точкам.** Цикл разработан для наружного и внутреннего точения, может быть многопроходным для черновой обработки и однопроходным для чистовой обработки. Переменные цикла представлены в Таблице 4.2 и на Рисунке 4.2. Цикл позволяет произвести токарную обработку сектора заготовки, заданного линейными или угловыми размерами. Особенностью черновых проходов является оптимизация рабочих движений резания и получаемое качество поверхности за счет присутствия окончательного полустистового прохода вдоль всей обрабатываемой поверхности.

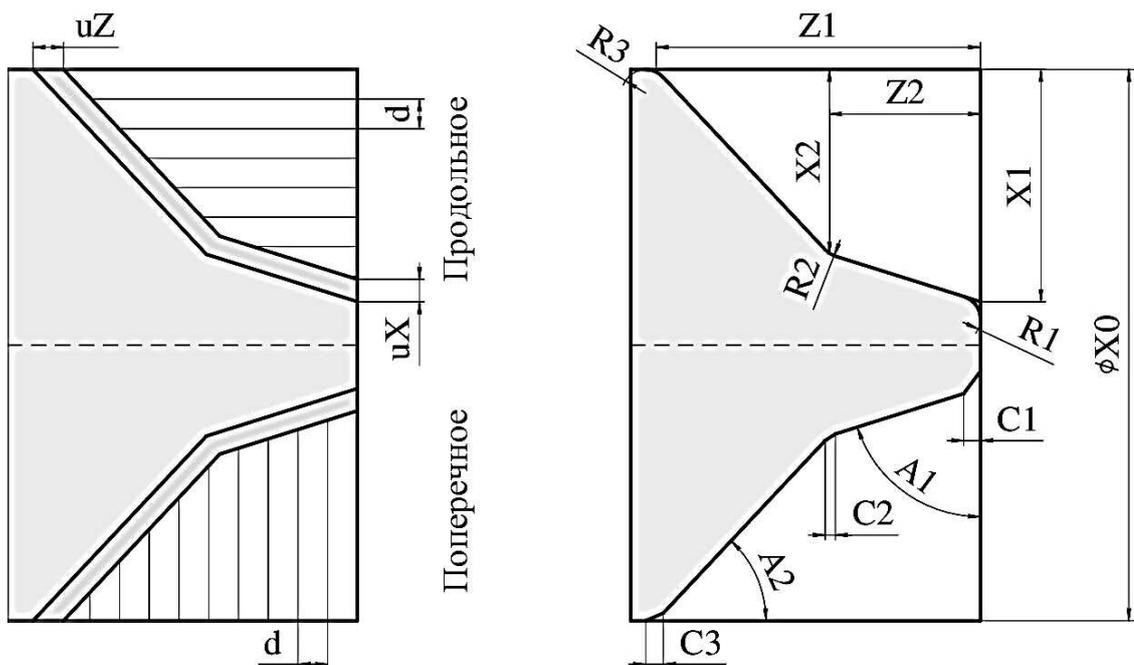


Рисунок 4.2 – Переменные цикла многопроходного точения по заданным точкам

Таблица 4.2 – Переменные цикла многопроходного точения по заданным точкам

Параметр	Обозначение	Переменная цикла	Индексы выбора	Расшифровка индексов
Расположение обработки	-	TRN1	0	наружная
			1	внутренняя
Класс обработки	-	TRN2	0	черновая
			1	чистовая
Стратегия обработки	-	TRN3	0	продольная
			1	поперечная
Задание точки X2Z2		TRN4	0	X2Z2
			1	X2A1
			2	X2A2
			3	Z2A1
			4	Z2A2
Величина врезания	d	TRN5	-	-
Чистовой припуск по X	uX	TRN6	-	-
Чистовой припуск по Z	uZ	TRN7	-	-
Начальная точка по X	X0	TRN8	-	-
Начальная точка по Z	Z0	TRN9	-	-
Величина X1	X1	TRN10	-	-
Величина Z1	Z1	TRN11	-	-
Величина X2 / Z2	X2 / Z2	TRN12	-	-
Величина Z2 / A1/ A2	Z2 / A1/ A2	TRN13	-	-
Тип притупления 1	-	TRN14	0	фаска
			1	радиус
Величина притупления 1	C1 / R1	TRN15	-	-
Тип притупления 2	-	TRN16	0	фаска
			1	радиус
Величина притупления 2	C2 / R2	TRN17	-	-
Тип притупления 3	-	TRN18	0	фаска
			1	радиус
Величина притупления 3	C3 / R3	TRN19	-	-

Цикл может вызываться неоднократно с однократным заданием параметров подпрограммы TOOLSET при обработке одним заданным инструментом с одним заданным корректором или режущей кромкой для минимизации движений инструмента из зоны обработки в точку смены инструмента.

При рассчитанном угле ступени меньше 180 градусов, радиус скругления становится равным радиусу резца, при угле больше 180 градусов, радиус или фаска принимает заданное в цикле значение.

Вызов цикла осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc:

*G65 P6041 A(TRN1) B(TRN2) C(TRN3) D(TRN4) E(TRN5) F(TRN6) H(TRN7) I(TRN8) J(TRN9) K(TRN10) M(TRN11) Q(TRN12) R(TRN13) S(TRN14) T(TRN15) U(TRN16) V(TRN17) W(TRN18) X(TRN19)*

- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол:

*STOCKREMOVAL(TRN1, TRN2, TRN3, TRN4, TRN5, TRN6, TRN7, TRN8, TRN9, TRN10, TRN11, TRN12, TRN13, TRN14, TRN15, TRN16, TRN17, TRN18, TRN19)*

**Цикл точения радиальной и торцевой канавки на цилиндрической и конической поверхностях.** Цикл разработан для обработки наружных, внутренних и торцевых канавок, расположенных на цилиндрических и конических поверхностях, может быть многопроходным для черновой обработки и однопроходным для чистовой обработки. Цикл позволяет произвести токарную обработку канавки, заданной линейными и угловыми размерами. Особенностью черновых движений резания является оптимизация рабочих движений резания и получаемое качество поверхности за счет выполнения получистовых проходов вдоль всего профиля канавки. Переменные цикла представлены в Таблице 4.3 и на Рисунке 4.3. Вызов цикла осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc:  $G65 P6042 A(GRV1) B(GRV2) C(GRV3) D(GRV4) E(GRV5) F(GRV6) H(GRV7) I(GRV8) J(GRV9) K(GRV10) M(GRV11) Q(GRV12) R(GRV13) S(GRV14) T(GRV15) U(GRV16) V(GRV17) W(GRV18) X(GRV19) Y(GRV20) Z(GRV21)$
- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол:  $GROOVING (GRV1, GRV2, GRV3, GRV4, GRV5, GRV6, GRV7, GRV8, GRV9, GRV10, GRV11, GRV12, GRV13, GRV14, GRV15, GRV16, GRV17, GRV18, GRV19, GRV20, GRV21)$

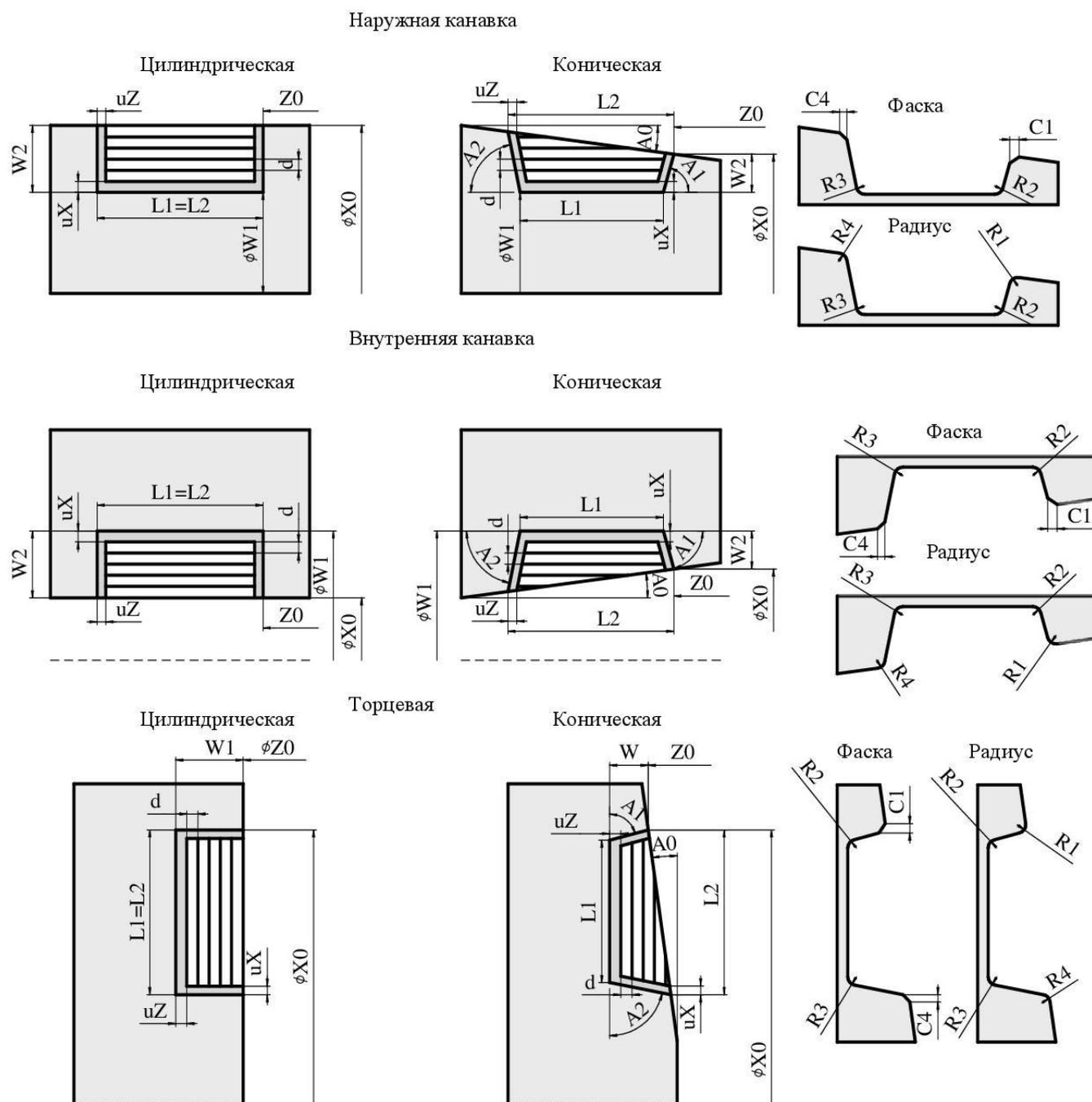


Рисунок 4.3 – Переменные цикла точения канавки

Таблица 4.3 – Переменные цикла точения канавки

Параметр	Обозначение	Переменная цикла	Индексы выбора	Расшифровка индексов
Расположение обработки	-	GRV1	0	наружная
			1	внутренняя
			2	торцевая
Класс обработки	-	GRV2	0	черновая
			1	чистовая
Тип базовой поверхности	-	GRV3	0	цилиндрическая
			1	коническая
Величина врезания	d	GRV4	-	-
Чистовой припуск по X	uX	GRV5	-	-
Чистовой припуск по Z	uZ	GRV6	-	-
Начальная точка по X	X0	GRV7	-	-
Начальная точка по Z	Z0	GRV8	-	-
Определение ширины канавки	-	GRV9	0	большая ширина
			1	меньшая ширина
Величина ширины канавки	L1/L2	GRV10	-	-
Определение положения дна канавки	-	GRV11	0	абсолютно
			1	относительно
Величина определения положения дна канавки	W1/W2	GRV12	-	-
Угол базовой поверхности	A0	GRV13	-	-
Угол канавки 1	A1	GRV14	-	-
Угол канавки 2	A2	GRV15	-	-
Тип притупления 1	-	GRV16	0	фаска
			1	радиус
Величина притупления 1	C1 / R1	GRV17	-	-
Величина притупления 2	R2	GRV18	-	-
Величина притупления 3	R3	GRV19	-	-
Тип притупления 4	-	GRV20	0	фаска
			1	радиус
Величина притупления 4	C4 / R4	GRV21	-	-

**Цикл многопроходного точения выточки.** Цикл разработан для обработки наружных и внутреннего токарных выточек, расположенных на цилиндрических и конических поверхностях специальным режущим инструментом, как правило,

имеющим угол в плане не больше 35 градусов, может быть многопроходным для черновой обработки и однопроходным для чистовой обработки.

Цикл позволяет произвести токарную обработку выточки, заданной линейными и угловыми размерами. Особенностью черновых проходов является оптимизация рабочих движений резания и получаемое качество поверхности за счет присутствия окончательного полукругового прохода вдоль контура всей выточки. Переменные цикла представлены в Таблице 4.4 и на Рисунке 4.4.

Вызов цикла осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc:  $G65 P6043 A(UNC1) B(UNC2) C(UNC3) D(UNC4) E(UNC5) F(UNC6) H(UNC7) I(UNC8) J(UNC9) K(UNC10) M(UNC11) Q(UNC12) R(UNC13) S(UNC14) T(UNC15) U(UNC16) V(UNC17) W(UNC18)$
- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол:  $UNDERCUT(UNC1, UNC2, UNC3, UNC4, UNC5, UNC6, UNC7, UNC8, UNC9, UNC10, UNC11, UNC12, UNC13, UNC14, UNC15, UNC16, UNC17, UNC18)$

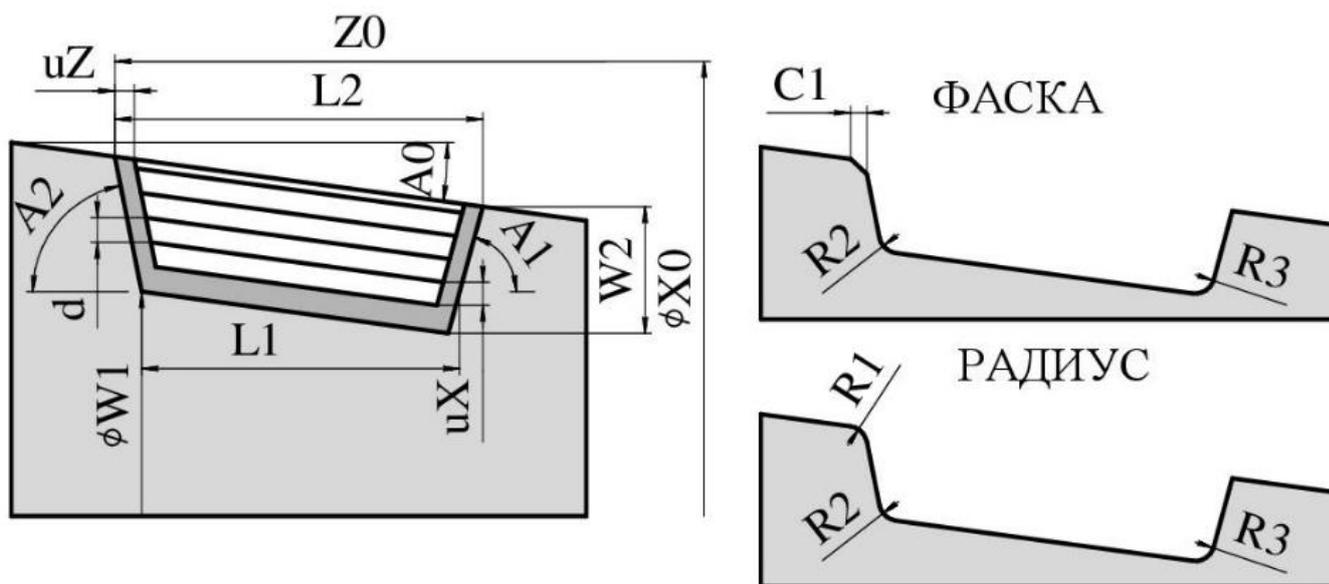


Рисунок 4.4 – Переменные цикла точения выточки

Таблица 4.4 – Переменные цикла точения выточки

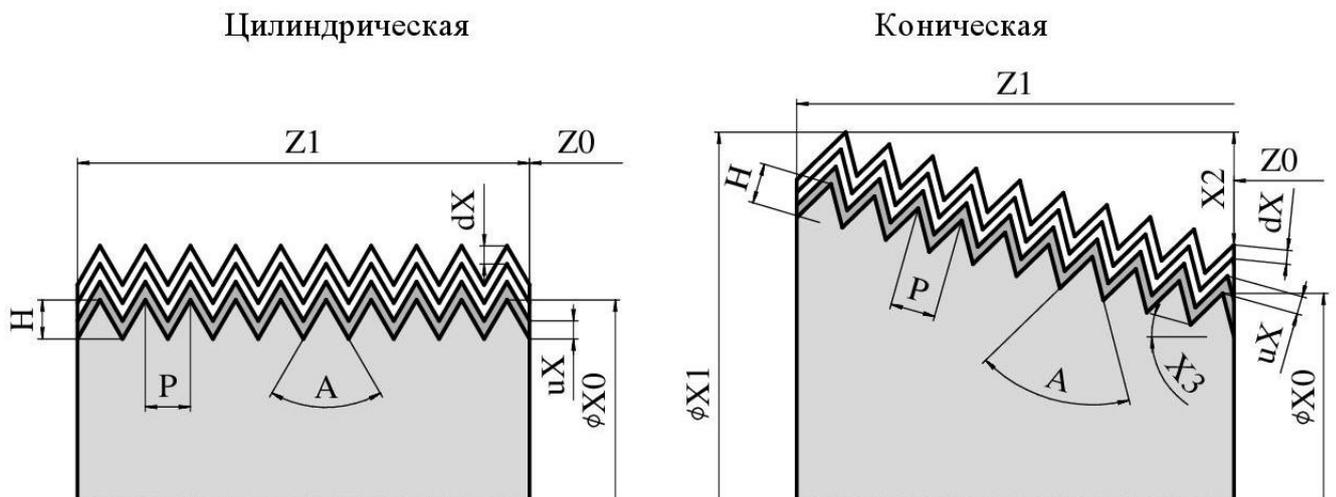
Параметр	Обозначение	Переменная цикла	Индексы выбора	Расшифровка индексов
Расположение обработки	-	UNC1	0	наружная
			1	внутренняя
Класс обработки	-	UNC2	0	черновая
			1	чистовая
Величина врезания	d	UNC3	-	-
Чистовой припуск по X	uX	UNC4	-	-
Чистовой припуск по Z	uZ	UNC5	-	-
Начальная точка по X	X0	UNC6	-	-
Начальная точка по Z	Z0	UNC7	-	-
Определение ширины выточки	-	UNC8	0	большая ширина
			1	меньшая ширина
Величина ширины выточки	L	UNC9	-	-
Определение положения дна выточки	-	UNC10	0	абсолютно
			1	относительно
Величина определения положения дна выточки	W	UNC11	-	-
Угол базовой поверхности	A0	UNC12	-	-
Угол выточки 1	A1	UNC13	-	-
Угол выточки 2	A2	UNC14	-	-
Тип притупления 1	-	UNC15	0	фаска
			1	радиус
Величина притупления 1	C1 / R1	UNC16	-	-
Величина притупления 2	R2	UNC17	-	-
Величина притупления 3	R3	UNC18	-	-

**Цикл многопроходного точения резьбы.** Цикл разработан для токарной обработки наружной и внутренней резьбы, расположенной на цилиндрической и конической поверхностях резцом с профильной резьбовой пластиной, может быть многопроходным для черновой обработки и однопроходным для чистовой обработки.

Цикл позволяет произвести токарную обработку резьбы, заданного шага, высоты и угла профиля. Переменные цикла представлены в Таблице 4.5 и на Рисунке 4.5.

Вызов цикла осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc:  $G65 P6044 A(THR1) B(THR2) C(THR3) D(THR4) E(THR5) F(THR6) H(THR7) I(THR8) J(THR9) K(THR10) M(THR11) Q(THR12) R(THR13) S(THR14)$
- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол:  $THREADING (THR1, THR2, THR3, THR4, THR5, THR6, THR7, THR8, THR9, THR10, THR11, THR12, THR13, THR14)$



- Рисунок 4.5 – Переменные цикла многопроходного точения наружной резьбы

Цикл точения резьбы для разных систем ЧПУ основывается на разных стандартных циклах:

- Для системы ЧПУ Fanuc основой является код G33 Z(Z1) F(P);
- Для системы Siemens основой является код G33 Z=Z K=P;
- Для системы АксиОМА Контрол основой является код G276 Q1...Q16.

Таблица 4.5 – Переменные цикла многопроходного точения резьбы

Параметр	Обозначение	Переменная цикла	Индексы выбора	Расшифровка индексов
Расположение обработки	-	THR1	0	наружная
			1	внутренняя
Класс обработки	-	THR2	0	черновая
			1	чистовая
Тип базовой поверхности	-	THR3	0	цилиндрическая
			1	коническая
Величина врезания	dX	THR4	-	-
Величина отвода	qX	THR5	-	-
Чистовой припуск	uX	THR6	-	-
Начальная точка по X	X0	THR7	-	-
Начальная точка по Z	Z0	THR8	-	-
Длина резьбы	L	THR9	-	-
Определение положения конечной точки	-	THR10	0	абсолютно
			1	относительно
			2	угол
Величина определения положения конечной точки	W	THR11	-	-
Шаг резьбы	P	THR12	-	-
Высота профиля резьбы	H	THR13	-	-
Угол профиля резьбы	A	THR14	-	-

**Цикл отрезки детали.** Цикл разработан для отрезки готовой детали отрезным резцом. В структуре цикла есть возможность задать притупление острой кромки со стороны отрезаемой части, а также предусмотрена возможность понижения оборотов и рабочей подачи в определенной точке для плавного

отрезания детали. Через предварительно заданный цикл TOOLSET есть возможность активировать использование уловителя деталей. Цикл позволяет запрограммировать отрезку детали как положительной, так и в отрицательной плоскостях, что актуально для токарных станков, имеющих контр-шпиндель. Переменные цикла представлены в Таблице 4.6. Вызов цикла осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc: *G65 P6045 A(CUT1) B(CUT2) C(CUT3) D(CUT4) E(CUT5) F(CUT6) H(CUT7) I(CUT8) J(CUT9) K(CUT10)*
- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол: *PARTOFF (CUT1, CUT2, CUT3, CUT4, CUT5, CUT6, CUT7, CUT8, CUT9, CUT10)*

Таблица 4.6 – Переменные цикла отрезки детали

Параметр	Обозначение	Переменная цикла	Индексы выбора	Расшифровка индексов
Начальная точка по X	X0	CUT1	-	-
Начальная точка по Z	Z0	CUT2	-	-
Определение положения конечной точки 1	-	CUT3	0	абсолютно
			1	относительно
Величина определения положения конечной точки 1	X11 / X12	CUT4	-	-
Тип притупления	-	CUT5	0	фаска
			1	радиус
Величина притупления	C/ R	CUT6	-	-
Определение положения конечной точки 2	-	CUT7	0	абсолютно
			1	относительно
Величина определения положения конечной точки 2	X21 / X22	CUT8	-	-
Пониженные обороты	S2	CUT9	-	-
Пониженная подача	F2	CUT10	-	-

### 4.3 Циклы сверления и фрезерования

Для сокращения длины управляющей программы сверлильной или фрезерной обработки, макропрограммы обработки одним инструментом с одним корректором можно вызывать в неограниченном количестве после макропрограммы технологического цикла, циклов поворота плоскости и циклов позиционирования при повторяющемся расположении элементов обработки. Обработка может вестись во всех известных плоскостях XY, XZ, YZ, что актуально для специализированного оборудования.

Алгоритм работы циклов предусматривает:

- 1) перемещение инструмента с подачей ускоренного перемещения G0 в точку старта цикла Z0, затем в точку X0Y0. В зависимости от расположения обработки (снаружи или внутри) и направлении резания (+Z (+Y, +X) или -Z (-Y, -X), инструмент перемещается на рабочей подаче вниз или вверх, вправо или влево от точки старта цикла на величину врезания dFP;
- 2) врезание инструмента с рабочей подачей G1 до достижения величины FP1;
- 3) активирование черновых проходов в плоскости для обработки фрезерных элементов с величиной врезания dP в плоскости до достижения требуемых размеров и активирование чистового прохода в плоскости для обработки фрезерных элементов с учетом припуска на чистовую обработку uP с рабочей подачей G1;
- 4) отвод инструмента в точку старта цикла X0Y0, затем в Z0 с рабочей подачей G1;

Блок-схема алгоритма работы циклов точения представлена на Рисунке 4.6, переменные циклов фрезерной обработки представлены в Таблице 4.7, обобщенные переменные цикла MILL1 – MILL9 в структуре цикла заменяются на соответствующие циклу переменные (например, MILL1-> SLT1, MILL2-> SLT2 и т.д.). Специальные переменные каждого цикла фрезерной обработки, а также

параметры циклов сверления, нарезания резьбы метчиком и фрезерования резьбы рассмотрены отдельно в соответствующих разделах Главы 4.

Циклы фрезерования работают таким образом, что коррекция на радиус режущего инструмента (G42 для плоскости XY или G41 для плоскости ZY) не включается из-за различных алгоритмов перевода полярной оси C в линейные движения на различном оборудовании с идентичными системами ЧПУ.

Таблица 4.7 – Переменные циклов фрезерной обработки

Переменная	Обозначение	Переменная цикла	Индексы выбора	Расшифровка индексов
Плоскость обработки	-	MILL1	0	XY
			1	XZ
			2	ZY
			3	XC
			4	ZCX
Класс обработки	-	MILL2	0	черновая
			1	чистовая
Стратегия обработки	-	MILL3	0	встречная
			1	попутная
Величина врезания в плоскости резания	dP	MILL4	-	-
Величина врезания на глубину	dFP	MILL5	-	-
Чистовой припуск в плоскости резания	uP	MILL6	-	-
Чистовой припуск на глубину	uFP	MILL7	-	-
Начальная точка по глубине	FP0	MILL8	-	-
Конечная точка по глубине	FP1	MILL9	-	-

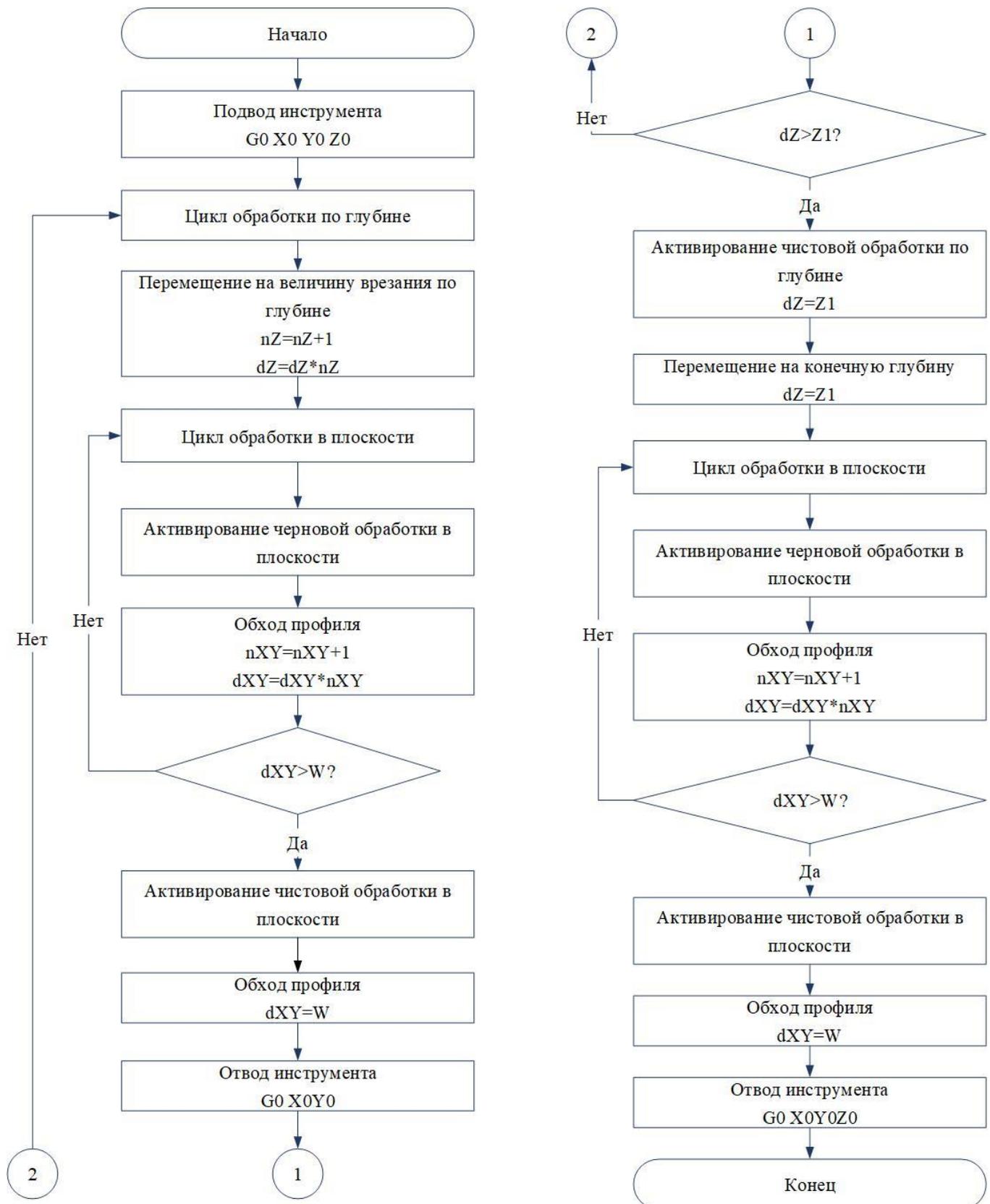


Рисунок 4.6 – Алгоритм работы циклов обработки приводным инструментом

Для системы ЧПУ Siemens все перемещения заданы с использованием перемещений рабочего хода G1, G2, G3 в координатах X, Y и Z, так как система конвертирует перемещение по оси Y в угол поворота по оси C с использованием режимов TRANSMIT и TRACYL.

Для системы ЧПУ Fanuc используется интерполяция в полярных координатах G12.1 для плоскости XY или режим цилиндрической интерполяции G7.1 для плоскости ZY с использованием перемещений рабочего хода G1, G2, G3; для системы ЧПУ АксиОМА Контрол алгоритм рассчитан в координатах XY и ZY с использованием перемещений рабочего хода G1, G2, G3.

**Цикл глубокого сверления.** Цикл представлен сверлением с заданным отводом вдоль оси резания для отверстий, глубина которых не превышает 5 диаметров или отводом на плоскость безопасности для отверстий глубиной, превышающей 5 диаметров. При заданном режиме сверления стружка ломается и выводится из зоны обработки благодаря возвратно-поступательному движению инструмента. Использование цикла возможно для центрования, зенкерования и развертывания отверстий с использованием специализированной оснастки. В работе цикла присутствует возможность дополнительной фиксации шпинделя посредством тормоза, помимо стандартной фиксации главной осью вращения шпинделя. Переменные цикла представлены в Таблице 4.8 и на Рисунке 4.7.

#### Сверление с отводом

#### Сверление с выводом из отверстия

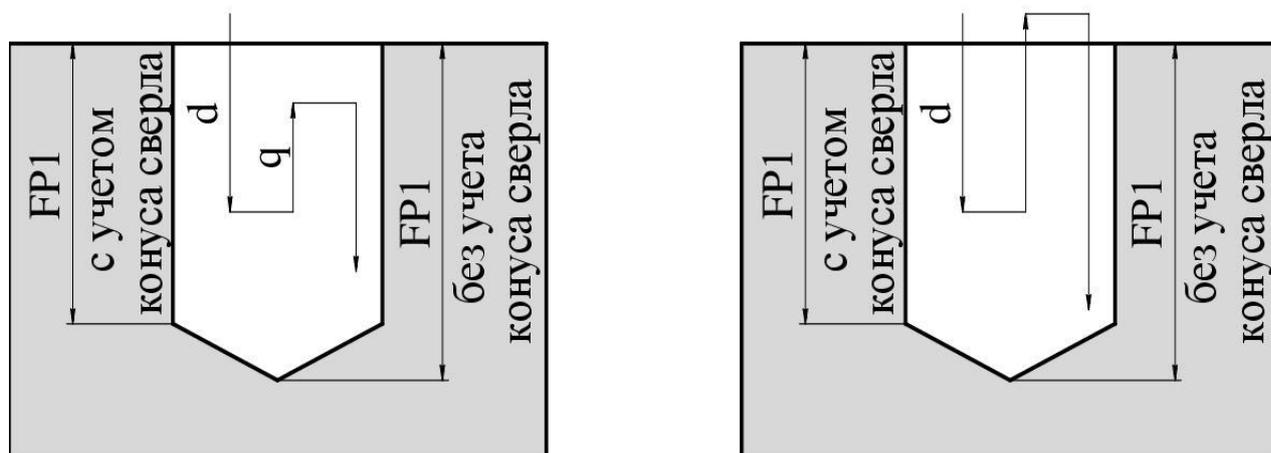


Рисунок 4.7 – Переменные цикла глубокого сверления

Таблица 4.8 – Переменные цикла глубокого сверления

Переменная	Обозначение	Переменная цикла	Индексы выбора	Расшифровка индексов
Стратегия обработки	-	DRL2	0	с отводом
			1	с выводом
Определение глубины обработки	-	DRL3	0	с учетом конуса сверла
			1	без учета конуса сверла
Величина врезания	d	DRL4	-	-
Величина отвода	q	DRL5	-	-
Выдержка времени по достижению глубины	dT	DRL6	-	-
Начальная точка по глубине	FP0	DRL7	-	-
Конечная точка по глубине	FP1	DRL8	-	-

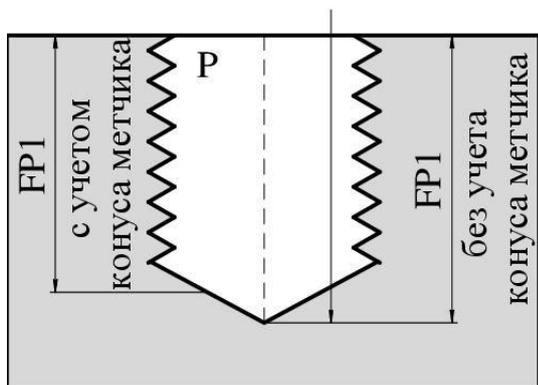
Вызов цикла осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc: *G65 P6021 A(DRL1) B(DRL2) C(DRL3) D(DRL4) E(DRL5) F(DRL6) H(DRL7) I(DRL8)*
- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол: *DEEPHOLEDRILLING (DRL1, DRL2, DRL3, DRL4, DRL5, DRL6, DRL7, DRL8)*

**Цикл нарезания резьбы метчиком.** Цикл представлен нарезанием резьбы метчиком в отверстии: для метчиков, закрепленных в неподвижный блок для нарезания резьбы по центру, используется цикл жесткого нарезания без компенсации, а для обработки с вращающимся метчиком используется цикл нарезания резьбы с продольной компенсацией метчика. В работе цикла присутствует возможность дополнительной фиксации шпинделя посредством

тормоза, помимо стандартной фиксации главной осью вращения шпинделя. Переменные цикла представлены в Таблице 4.9 и на Рисунке 4.8.

Нарезание резьбы за 1 проход



Нарезание резьбы с выводом из отверстия

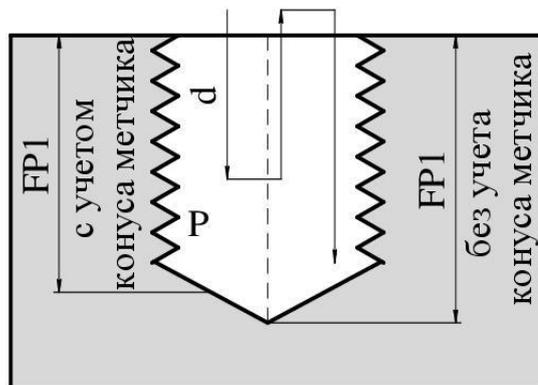


Рисунок 4.8 – Переменные цикла нарезания резьбы метчиком

Таблица 4.9 – Переменные цикла нарезания резьбы метчиком

Переменная	Обозначение	Переменная цикла	Индексы выбора	Расшифровка индексов
Стратегия обработки	-	TAP2	0	за 1 проход
			1	с выводом
Определение глубины обработки	-	TAP3	0	с учетом конуса метчика
			1	без учета конуса метчика
Величина врезания	d	TAP4	-	-
Выдержка времени по достижению глубины	dT	TAP5	-	-
Начальная точка по глубине	FP0	TAP6	-	-
Конечная точка по глубине	FP1	TAP7	-	-
Шаг резьбы	P	TAP8	-	-

Вызов цикла осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc: *G65 P6022 A(TAP1) B(TAP2) C(TAP3) D(TAP4) E(TAP 5) F(TAP6) H(TAP7) I(TAP8)*
- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол: *TAPPING (TAP1, TAP2, TAP3, TAP4, TAP5, TAP6, TAP7, TAP8)*

Цикл нарезания резьбы метчиком для разных систем ЧПУ основывается на разных стандартных циклах:

- Для системы ЧПУ Fanuc основой является код *G84 Z(Z1) F(P)*;
- Для системы ЧПУ Siemens основой является код *G331 Z=Z1 K=P*;
- Для системы ЧПУ АксиОМА Контрол основой является код, основанный на управлении шпинделем в режиме оси, где через шаг и длину резьбы задается количество градусов, на которые должен повернуться шпиндель при движении вдоль оси резьбы в режиме относительного приращения. Код управляющего движения выглядит следующим образом: *G91 G1 Z=Z1 C=Z1/P\*360*.

**Цикл фрезерования продольного паза.** Цикл представлен последовательностью продольных перемещений инструмента для выполнения продольного паза с заданной длиной, шириной и глубиной может быть многопроходным для черновой обработки с припуском и однопроходным для чистовой обработки. Инструмент начинает обработку с центра паза, смещаясь продольно на величину  $L/2$  в одну сторону, потом врезаясь на величину  $dP$  и двигаясь параллельно контуру паза. Обработка может быть встречной и попутной в зависимости от геометрии обрабатываемого элемента, материала заготовки и материала фрезы. Переменные цикла представлены в Таблице 4.10 и на Рисунке 4.9. Вызов цикла осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc: *G65 P6024 A(SLT1) B(SLT2) C(SLT3) D(SLT4) E(SLT 5) F(SLT6) H(SLT7) I(SLT8) J(SLT9) K(SLT10) M(SLT11) Q(SLT12)*

- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол:

*LONGITUDINALSLOT* (*SLT1*, *SLT2*, *SLT3*, *SLT4*, *SLT5*, *SLT6*, *SLT7*, *SLT8*, *SLT9*, *SLT10*, *SLT11*, *SLT12*)

Таблица 4.10 – Переменные цикла фрезерования продольного паза

Переменная	Обозначение	Переменная цикла
Длина паза	L	SLT10
Ширина паза	W	SLT11
Угол наклона паза	A	SLT12

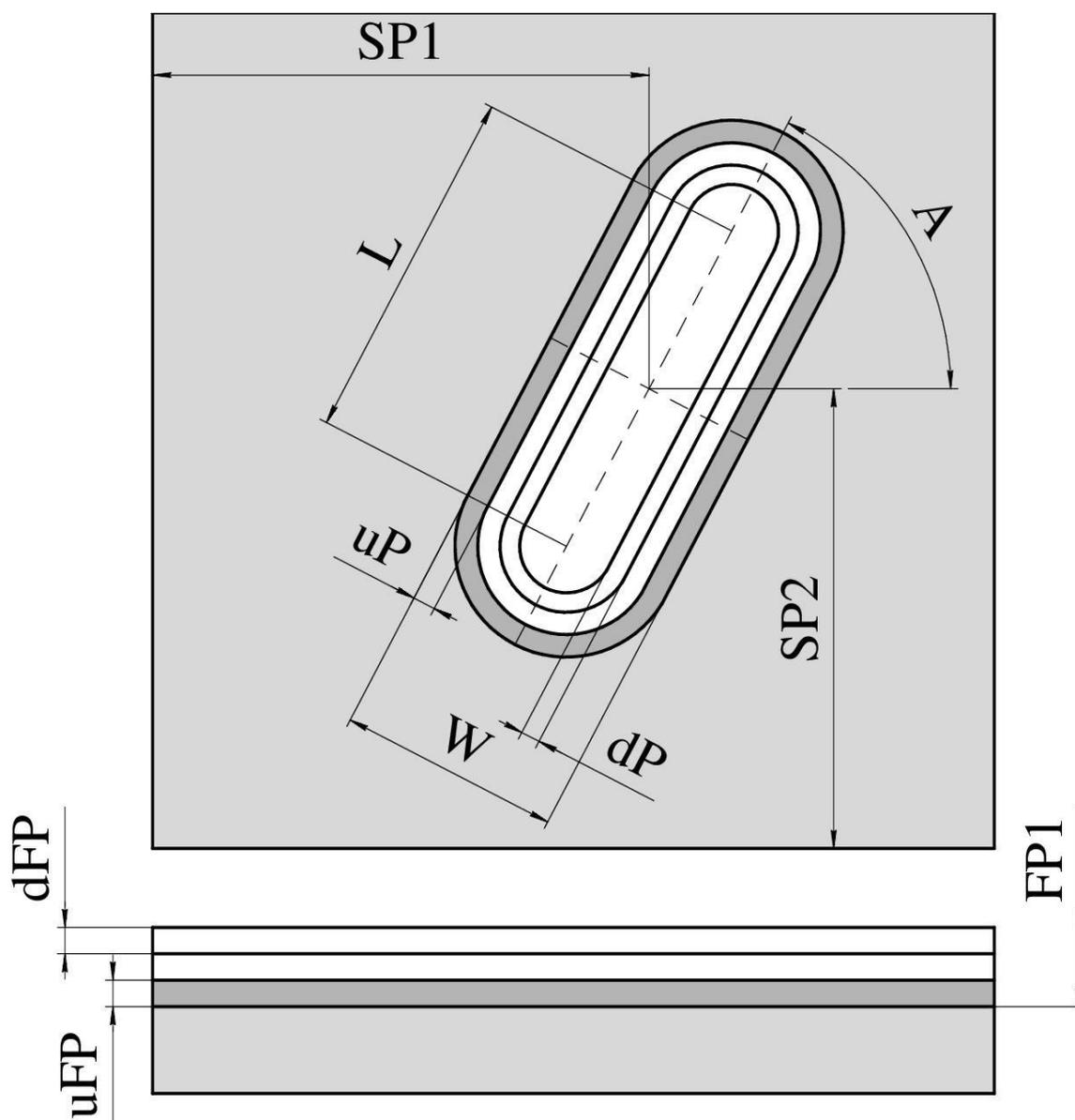


Рисунок 4.9 – Переменные цикла фрезерования продольного паза

**Цикл фрезерования кольцевого паза.** Цикл представлен последовательностью круговых перемещений инструмента для выполнения кольцевого паза с заданной шириной и углом раскрытия, может быть многопроходным для черновой обработки с припуском и однопроходным для чистовой обработки. Инструмент начинает обработку с центра края паза, смещаясь по окружности, равной радиусу паза до центра другого края паза, потом врезаюсь на величину  $d_{FP}$  и двигаясь параллельно контуру паза. Обработка может быть встречной и попутной в зависимости от геометрии обрабатываемого элемента, материала заготовки и материала фрезы. Переменные цикла представлены в Таблице 4.11 и на Рисунке 4.10.

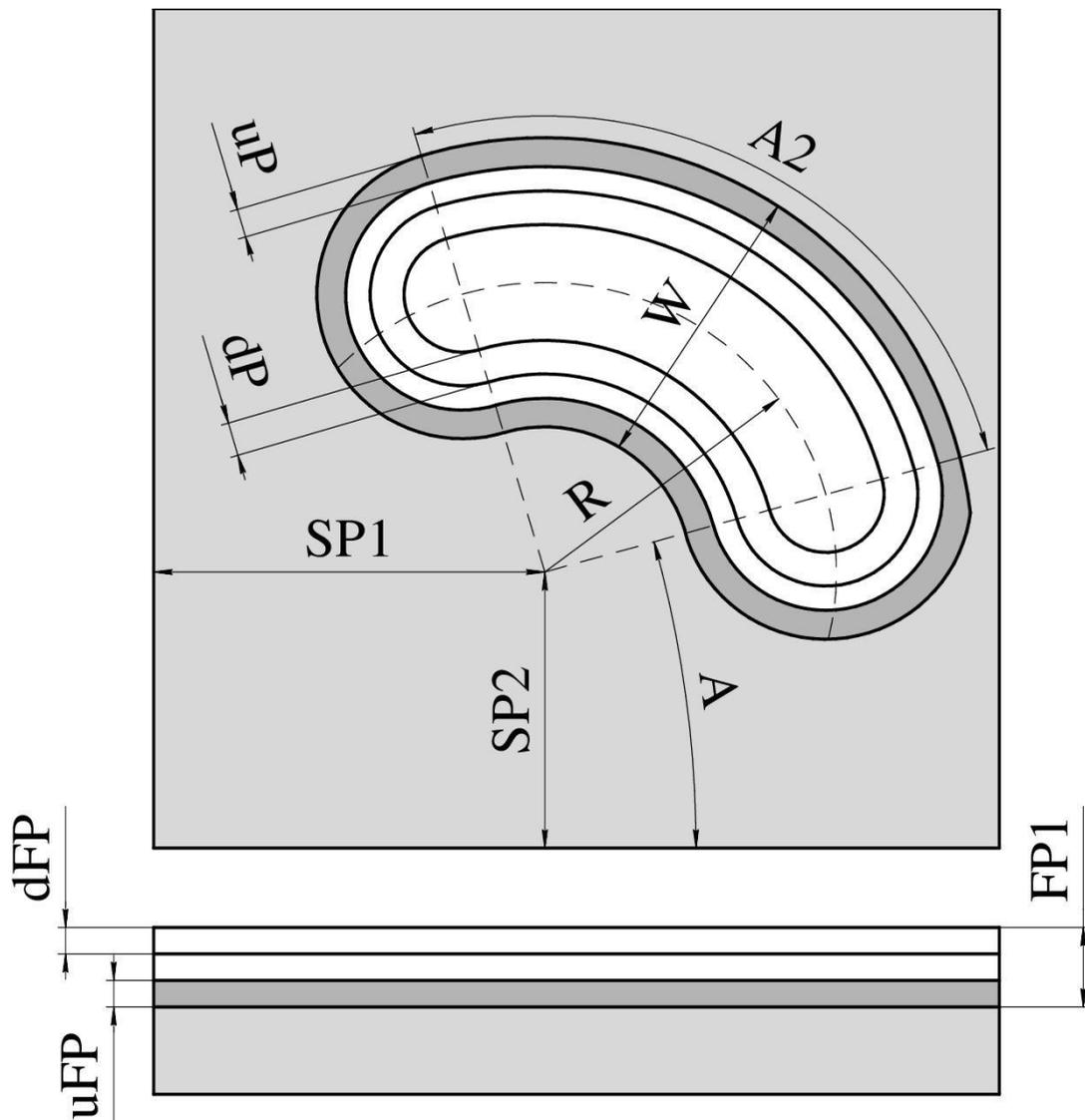


Рисунок 4.10 – Переменные цикла фрезерования кольцевого паз

Вызов цикла осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc: *G65 P6022 A(RSLT1) B(RSLT2) C(RSLT3) D(RSLT4) E(RSLT5) F(RSLT6) H(RSLT7) I(RSLT8) J(RSLT9) K(RSLT10) M(RSLT11)*
- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол: *CIRCUMFERENTIALSLOT (RSLT1, RSLT2, RSLT3, RSLT4, RSLT5, RSLT6, RSLT7, RSLT8, RSLT9, RSLT10, RSLT11)*

Таблица 4.11 – Переменные цикла фрезерования кольцевого паза

Переменная	Обозначение	Переменная цикла
Ширина паза	W	CSLT10
Угол раскрытия паза	A	CSLT11

**Цикл фрезерования прямоугольного кармана.** Цикл представлен последовательностью продольных и круговых перемещений инструмента для выполнения контура прямоугольного кармана с заданной длиной, шириной, углом наклона, радиусом скругления углов и глубиной, может быть многопроходным для черновой обработки с припуском и однопроходным для чистовой обработки. Инструмент начинает обработку с центра кармана, врезаясь на величину  $d_P$  и двигаясь параллельно контуру кармана. Обработка может быть встречной и попутной в зависимости от геометрии обрабатываемого элемента, материала заготовки и материала фрезы. Переменные цикла представлены в Таблице 4.12 и на Рисунке 4.11.

Вызов цикла осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc: *G65 P6025 A(PKT1) B(PKT2) C(PKT3) D(PKT4) E(PKT5) F(PKT6) H(PKT7) I(PKT8) J(PKT9) K(PKT10) M(PKT11) Q(PKT12) R(PKT13)*

- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол: *RECTANGLEPOCKET* (*PKT1, PKT2, PKT3, PKT4, PKT5, PKT6, PKT7, PKT8, PKT9, PKT10, PKT11, PKT12, PKT13*)

Таблица 4.12 – Переменные цикла фрезерования прямоугольного кармана

Переменная	Обозначение	Переменная цикла
Длина кармана	L	PKT10
Ширина кармана	W	PKT11
Радиус скругления углов кармана	R	PKT12
Угол наклона кармана	A	PKT13

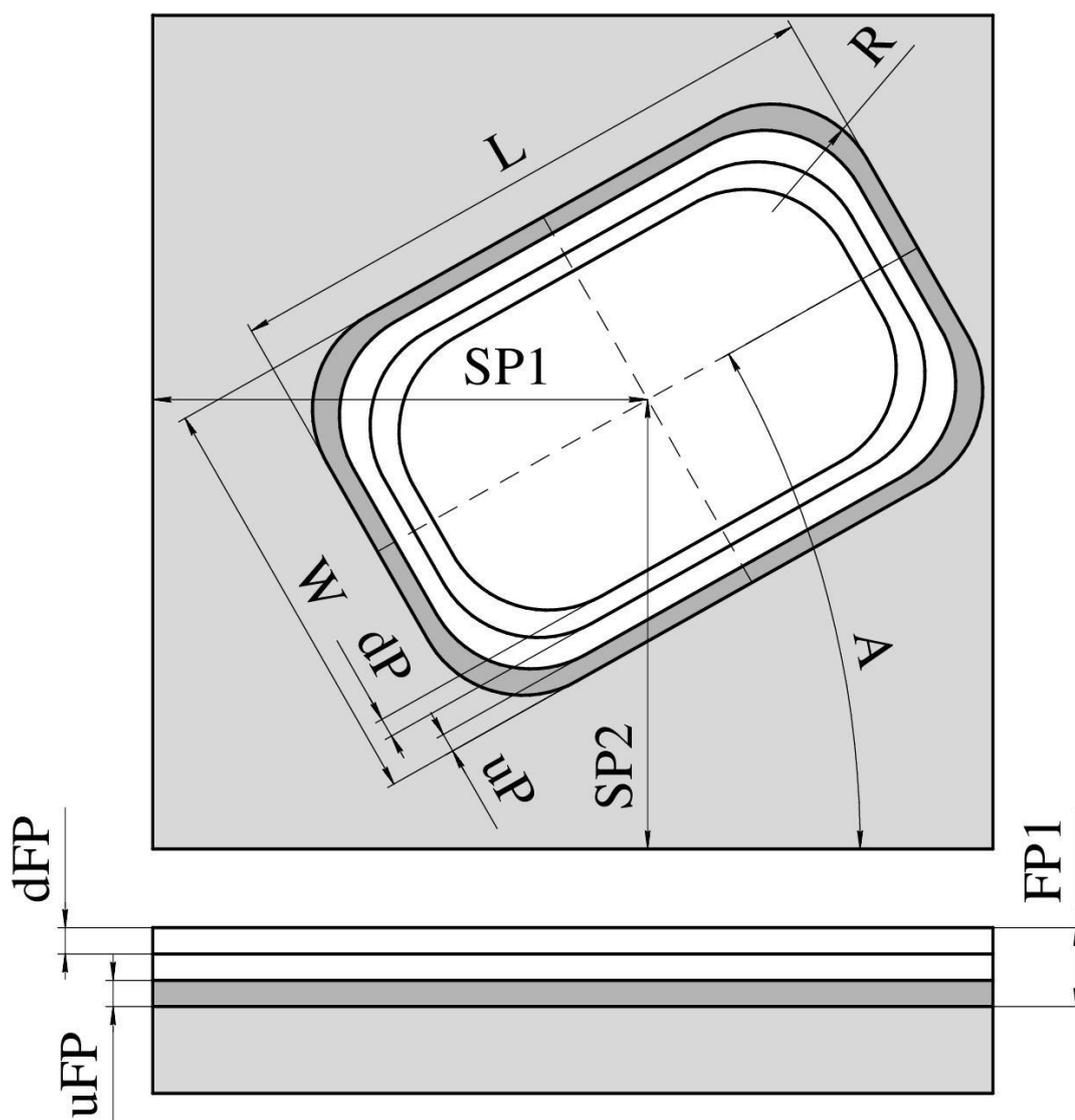


Рисунок 4.11 – Переменные цикла фрезерования прямоугольного кармана

**Цикл фрезерования круглого кармана.** Цикл представлен последовательностью круговых перемещений инструмента для выполнения круглого кармана с заданным диаметром, может быть многопроходным для черновой обработки с припуском и однопроходным для чистовой обработки. Инструмент начинает обработку с центра кармана, врезаясь на величину  $dP$  и двигаясь параллельно контуру кармана. Обработка может быть встречной и попутной в зависимости от геометрии обрабатываемого элемента, материала заготовки и материала фрезы. Переменные цикла представлены на Рисунке 4.12.

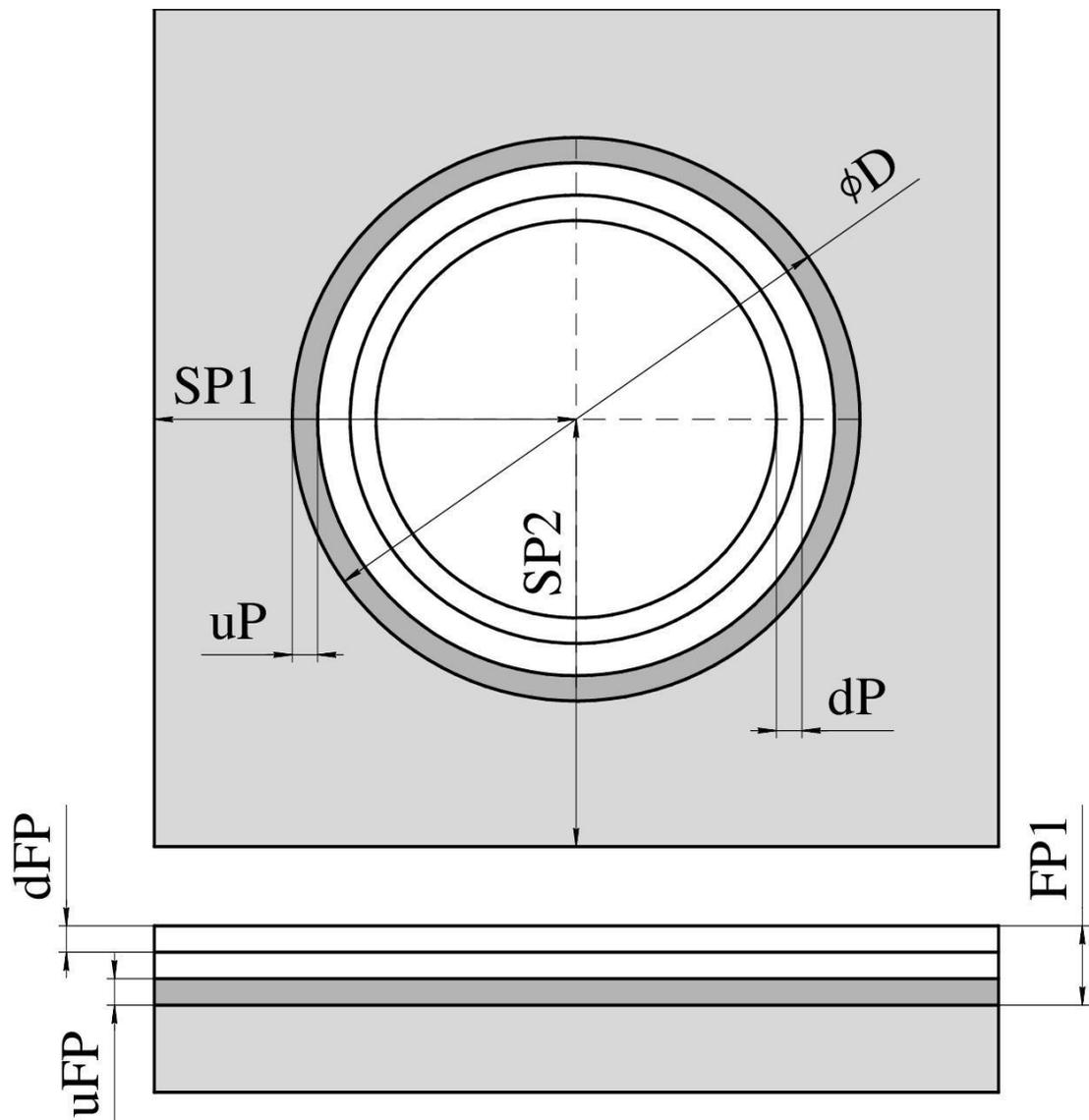


Рисунок 4.12 - Переменные цикла фрезерования круглого кармана

Вызов цикла осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc: *G65 P6026 A(RPKT1) B(RPKT2) C(RPKT3) D(RPKT4) E (RPKT 5) F(RPKT6) H(RPKT7) I(RPKT8) J(RPKT9) K(RPKT10)*
- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол: *CIRCULARPOCKET (RPKT1, RPKT2, RPKT3, RPKT4, RPKT5, RPKT6, RPKT7, RPKT8, RPKT9, RPKT10)*

**Цикл фрезерования многоугольного кармана.** Цикл представлен последовательностью продольных и круговых перемещений инструмента для выполнения контура многоугольного кармана с заданной длиной стороны или размером под ключ, количеством граней, углом наклона, радиусом скругления углов и глубиной, может быть многопроходным для черновой обработки с припуском и однопроходным для чистовой обработки. Инструмент начинает обработку с центра кармана, врезаясь на величину  $dP$  и двигаясь параллельно контуру кармана. Обработка может быть встречной и попутной в зависимости от геометрии обрабатываемого элемента, материала заготовки и материала фрезы. Переменные цикла представлены в Таблице 4.13 и на Рисунке 4.13.

Таблица 4.13 – Переменные цикла фрезерования многоугольного кармана

Переменная	Обозначение	Переменная цикла	Индексы выбора	Расшифровка индексов
Количество граней	N	MPKT10	-	-
Тип задания размера многогранника	-		0	длина грани
			1	размер под ключ
Величина заданного размера многогранника	L	MPKT12	-	-
Радиус скругления углов кармана	R	MPKT13	-	-
Угол наклона кармана	A	MPKT14	-	-

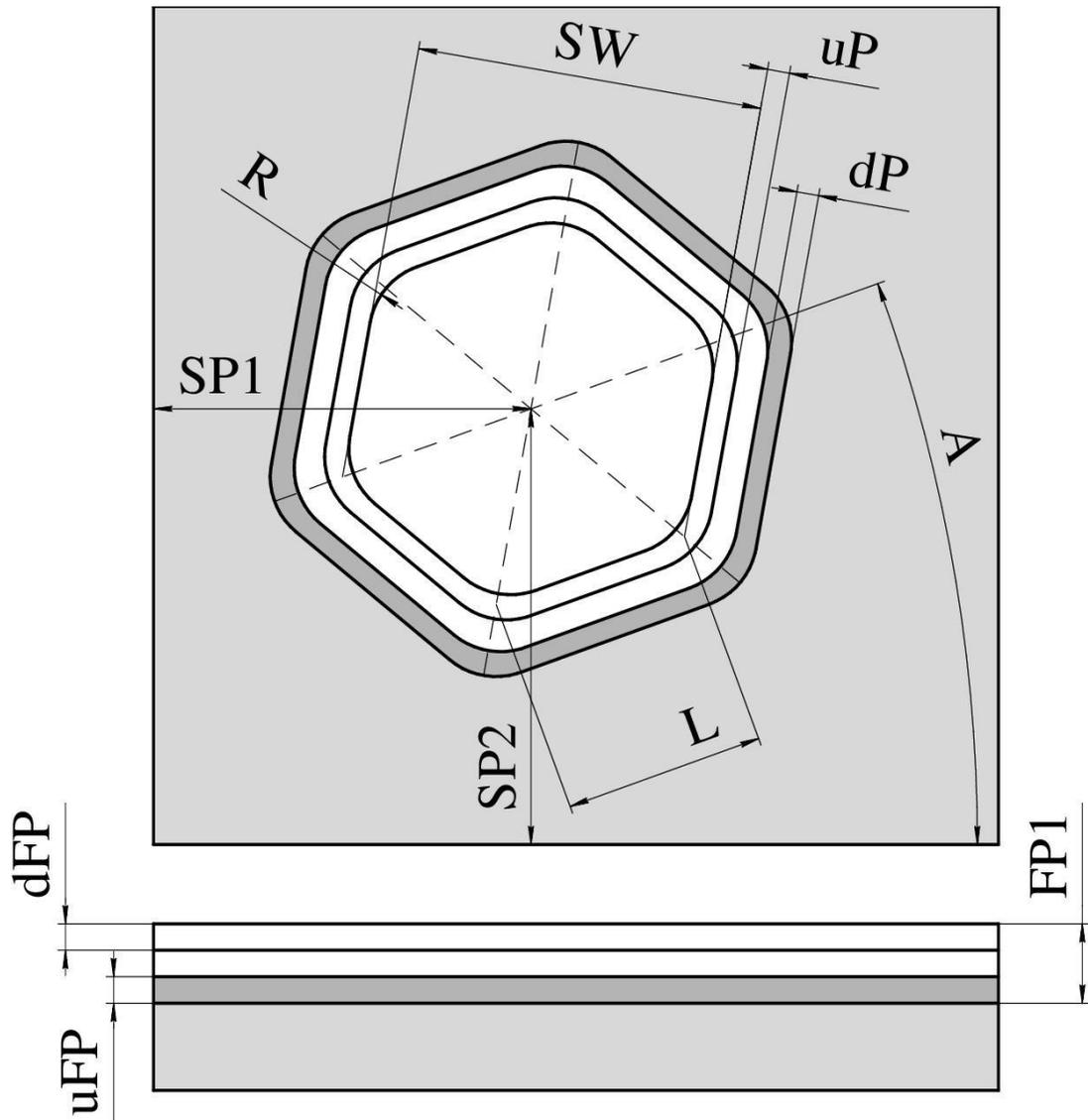


Рисунок 4.13 – Переменные цикла фрезерования многоугольного кармана

Вызов цикла осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc: *G65 P6027 A(MPKT1) B(MPKT2) C(MPKT3) D(MPKT4) E (MPKT 5) F(MPKT6) H(MPKT7) I(MPKT8) J(MPKT9) K(MPKT10) M(MPKT11) Q(MPKT12) R(MPKT13) S(MPKT14)*
- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол: *MULTIEDGEPOCKET (MPKT1, MPKT2, MPKT3, MPKT4, MPKT5, MPKT6, MPKT7, MPKT8, MPKT9, MPKT10, MPKT11, MPKT12, MPKT13, MPKT14)*

**Цикл фрезерования прямоугольного выступа.** Цикл представлен последовательностью продольных и круговых перемещений инструмента для

выполнения контура прямоугольного выступа с заданной длиной, шириной, углом наклона, радиусом скругления углов, глубиной и габаритными размерами заготовки, может быть многопроходным для черновой обработки с припуском и однопроходным для чистовой обработки. Инструмент начинает обработку с правого нижнего края выступа, врезаясь на величину  $dP$  и двигаясь параллельно контуру выступа. Обработка может быть встречной и попутной в зависимости от геометрии обрабатываемого элемента, материала заготовки и материала фрезы. Переменные цикла представлены в Таблице 4.14 и на Рисунке 4.14.

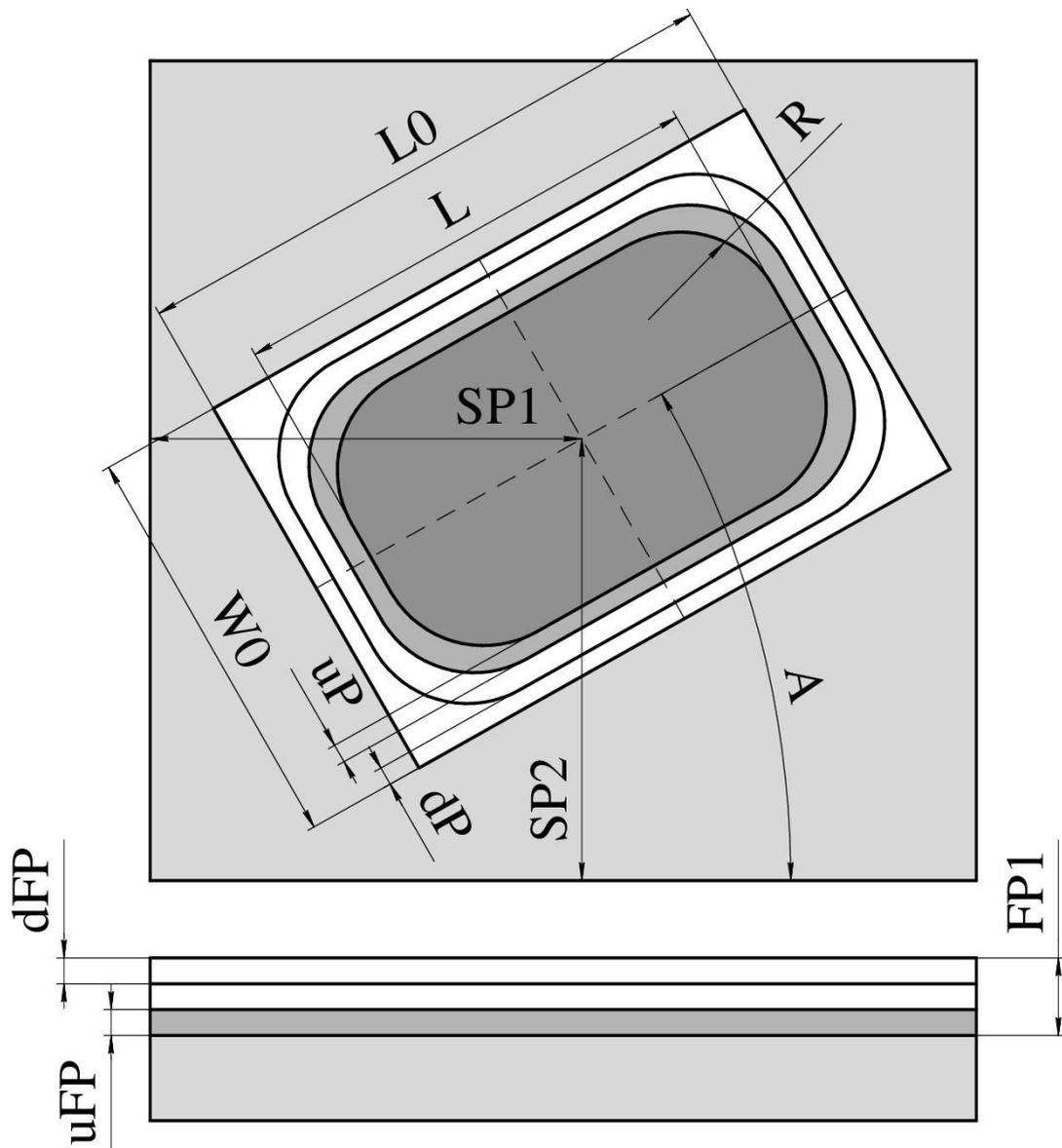


Рисунок 4.14 – Переменные цикла фрезерования прямоугольного выступа

Таблица 4.14 – Переменные цикла фрезерования прямоугольного выступа

Переменная	Обозначение	Переменная цикла
Длина выступа	L	SPGT10
Ширина выступа	W	SPGT11
Радиус скругления углов выступа	R	SPGT12
Угол наклона выступа	A	SPGT13
Длина заготовки	L0	SPGT14
Ширина заготовки	W0	SPGT15

Вызов цикла осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc: *G65 P6028 A(SPGT1) B(SPGT2) C(SPGT3) D(SPGT4) E (SPGT 5) F(SPGT6) H(SPGT7) I(SPGT8) J(SPGT9) K(SPGT10) M(SPGT11) Q(SPGT12) R(SPGT13) S(SPGT14) T(SPGT15)*
- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол: *RECTANGLESPIGOT (SPGT1, SPGT2, SPGT3, SPGT4, SPGT5, SPGT6, SPGT7, SPGT8, SPGT9, SPGT10, SPGT11, SPGT12, SPGT13, SPGT14, SPGT15)*

**Цикл фрезерования круглого выступа.** Цикл представлен последовательностью круговых перемещений инструмента для выполнения круглого выступа с заданным диаметром и диаметром заготовки, может быть многопроходным для черновой обработки с припуском и однопроходным для чистовой обработки. Инструмент начинает обработку с края выступа, врезаясь на величину  $dP$  и двигаясь параллельно контуру выступа. Обработка может быть встречной и попутной в зависимости от геометрии обрабатываемого элемента, материала заготовки и материала фрезы. Переменные цикла представлены в Таблице 4.15 и на Рисунке 4.15.

Вызов цикла осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc:  $G65 P6029 A(RSPGT1) B(RSPGT2) C(RSPGT3) D(RSPGT4) E(RSPGT5) F(RSPGT6) H(RSPGT7) I(RSPGT8) J(RSPGT9) K(RSPGT10) M(RSPGT11)$
- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол:  $CIRCULARSPIGOT (RSPGT1, RSPGT2, RSPGT3, RSPGT4, RSPGT5, RSPGT6, RSPGT7, RSPGT8, RSPGT9, RSPGT10, RSPGT11)$

Таблица 4.15 – Переменные цикла фрезерования круглого выступа

Переменная	Обозначение	Переменная цикла
Диаметр выступа	D	RSPGT10
Диаметр заготовки	D0	RSPGT11

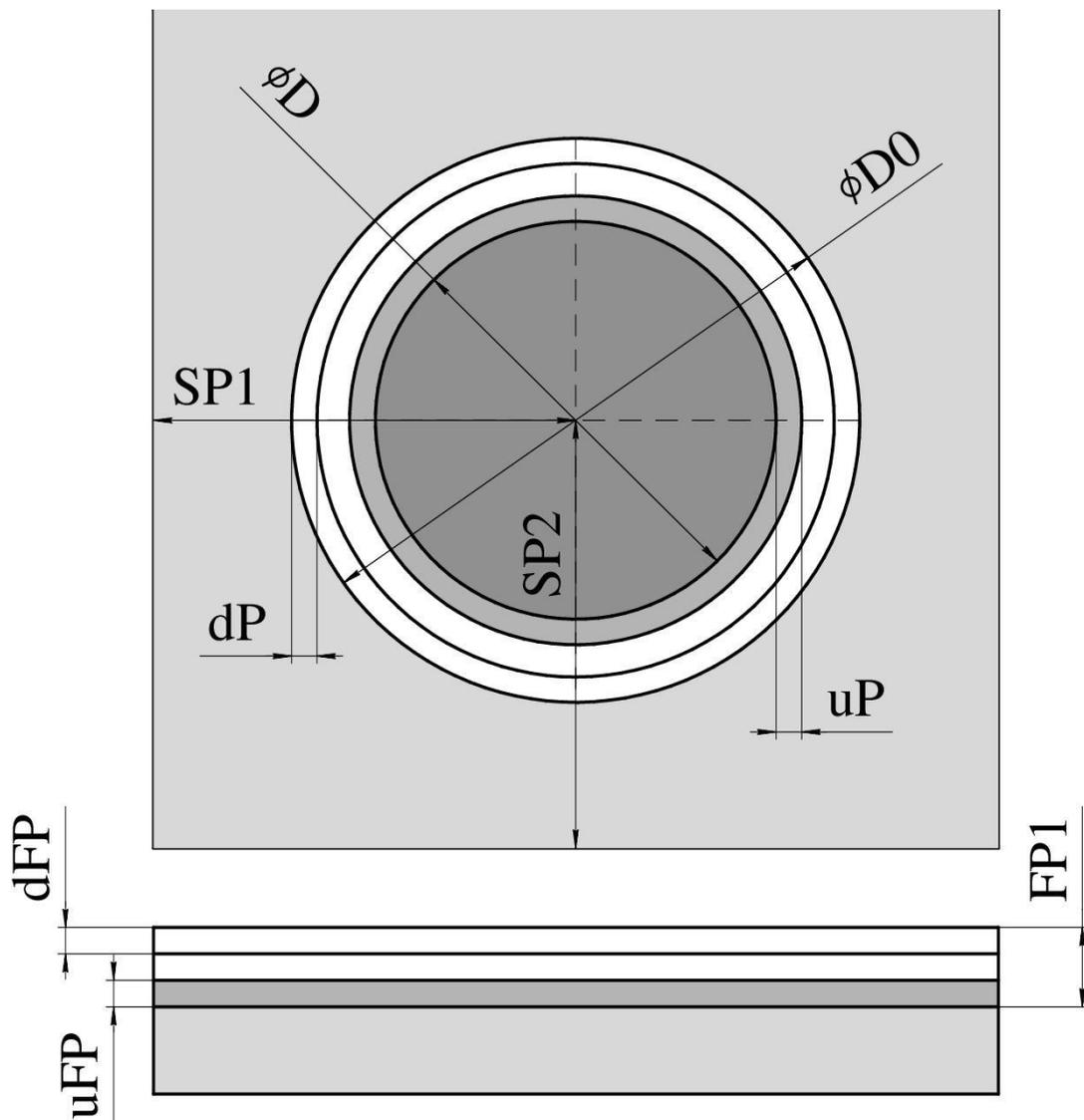


Рисунок 4.15 – Переменные цикла фрезерования круглого выступа

**Цикл фрезерования многоугольного выступа.** Цикл представлен последовательностью продольных и круговых перемещений инструмента для выполнения контура многоугольного выступа с заданной длиной стороны или размером под ключ, количеством граней, углом наклона, радиусом скругления углов, глубиной и диаметром заготовки, может быть многопроходным для черновой обработки с припуском и однопроходным для чистовой обработки. Инструмент начинает обработку с края выступа, врезаясь на величину  $dP$  и двигаясь параллельно контуру выступа. Обработка может быть встречной и попутной в зависимости от геометрии обрабатываемого элемента, материала заготовки и материала фрезы. Переменные цикла представлены в Таблице 4.16 и на Рисунке 4.16.

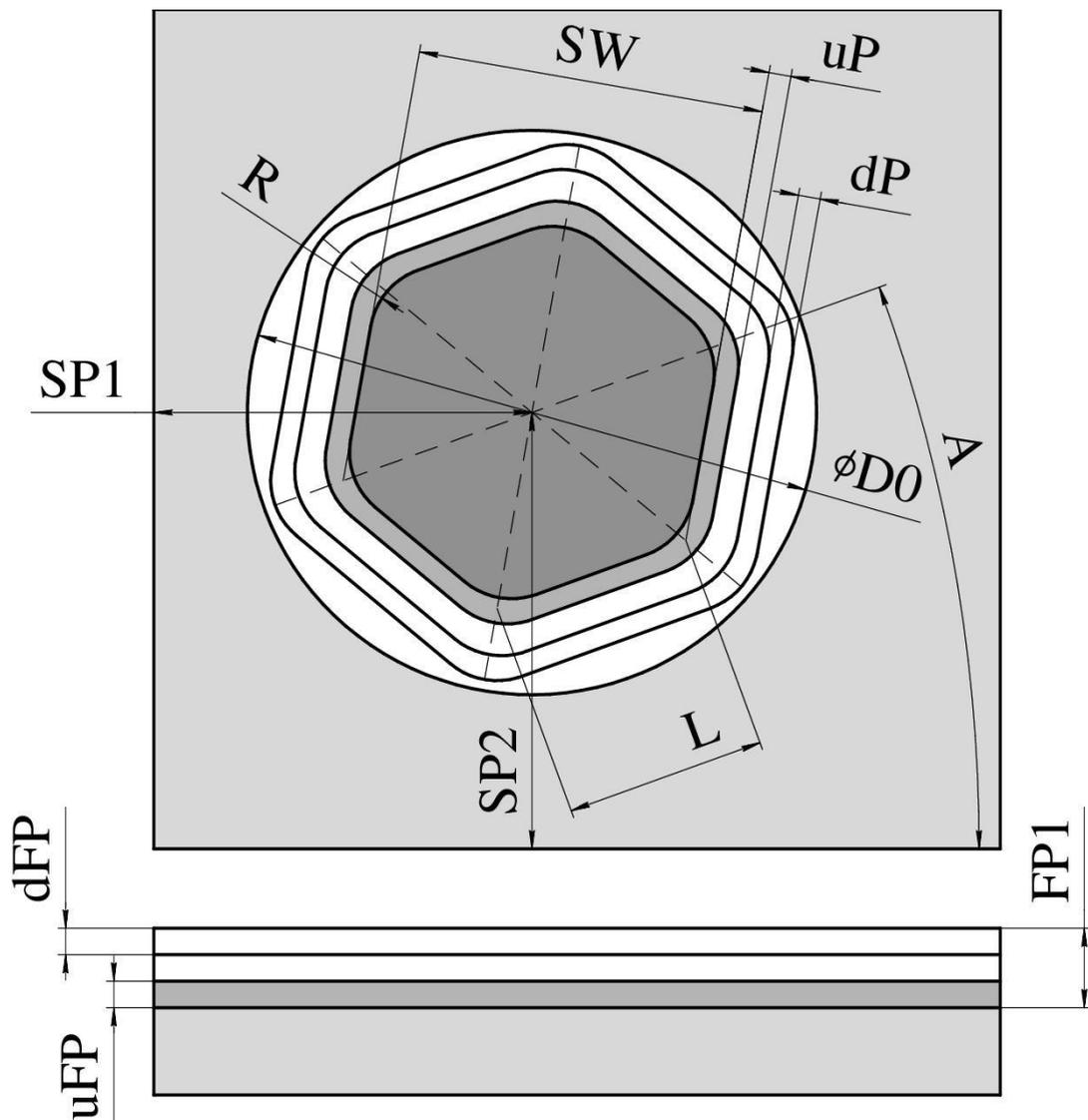


Рисунок 4.16 – Переменные цикла фрезерования многоугольного выступа

Таблица 4.16 – Геометрические параметры цикла фрезерования многоугольного выступа

Переменная	Обозначение	Переменная цикла	Индексы выбора	Расшифровка индексов
Количество граней	N	MSPGT10	-	-
Тип задания размера многогранника	-	MSPGT11	0	длина грани
			1	размер под ключ
Величина заданного размера многогранника	L	MSPGT12	-	-
Радиус скругления углов выступа	R	MSPGT13	-	-
Угол наклона выступа	A	MSPGT14	-	-
Диаметр заготовки	D0	MSPGT15	-	-

Вызов цикла осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc:

*G65 P6030 A(MSPGT1) B(MSPGT2) C(MSPGT3) D(MSPGT4) E (MSPGT 5) F(MSPGT6) H(MSPGT7) I(MSPGT8) J(MSPGT9) K(MSPGT10) M(MSPGT11) Q(MSPGT12) R(MSPGT13) S(MSPGT14) T(MSPGT15)*

- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол:

*MULTIEDGESPIGOT (MSPGT1, MSPGT2, MSPGT3, MSPGT4, MSPGT5, MSPGT6, MSPGT7, MSPGT8, MSPGT9, MSPGT10, MSPGT11, MSPGT12, MSPGT13, MSPGT14, MSPGT15)*

**Цикл фрезерования резьбы.** Цикл представлен фрезерованием резьбы резьбофрезой в отверстии или на круглом выступе. Стратегия цикла основывается на движении инструмента по рассчитанной спирали, эквивалентной спирали резьбы. Может быть многопроходным для черновой обработки с припуском и

однопроходным для чистовой обработки. Возможно использование резьбовых фрез с различным количеством зубьев: 1-зубые, 2-зубые, 4-зубые. Переменные цикла представлены в Таблице 4.17 и на Рисунке 4.17.

Вызов цикла осуществляется для рассматриваемых систем ЧПУ следующим образом:

- Для системы ЧПУ Fanuc: *G65 P6023 A(THRM1) B(THRM2) C(THRM3) D(THRM4) E(THRM 5) F(THRM6) H(THRM7) I(THRM8) J(THRM9) K(THRM10) M(THRM11)*
- Для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол: *THREADMILLING (THRM1, THRM2, THRM3, THRM4, THRM5, THRM6, THRM7, THRM8, THRM9, THRM10, THRM11)*

Таблица 4.17 – Переменные цикла фрезерования резьбы

Переменная	Обозначение	Переменная цикла	Индексы выбора	Расшифровка индексов
Класс обработки	-	THRM2	0	черновая
			1	чистовая
Тип резьбы	-	THRM3	0	наружная
			1	внутренняя
Направление резьбы	-	THRM4	0	правая
			1	левая
Величина врезания в плоскости	d	THRM5	-	-
Чистовой припуск в плоскости	u	THRM6	-	-
Начальная точка по глубине	FP0	THRM7	-	-
Конечная точка по глубине	FP1	THRM8	-	-
Номинальный диаметр резьбы	D0	THRM9	-	-
Шаг резьбы	P	THRM10	-	-
Высота профиля резьбы	H	THRM11	-	-

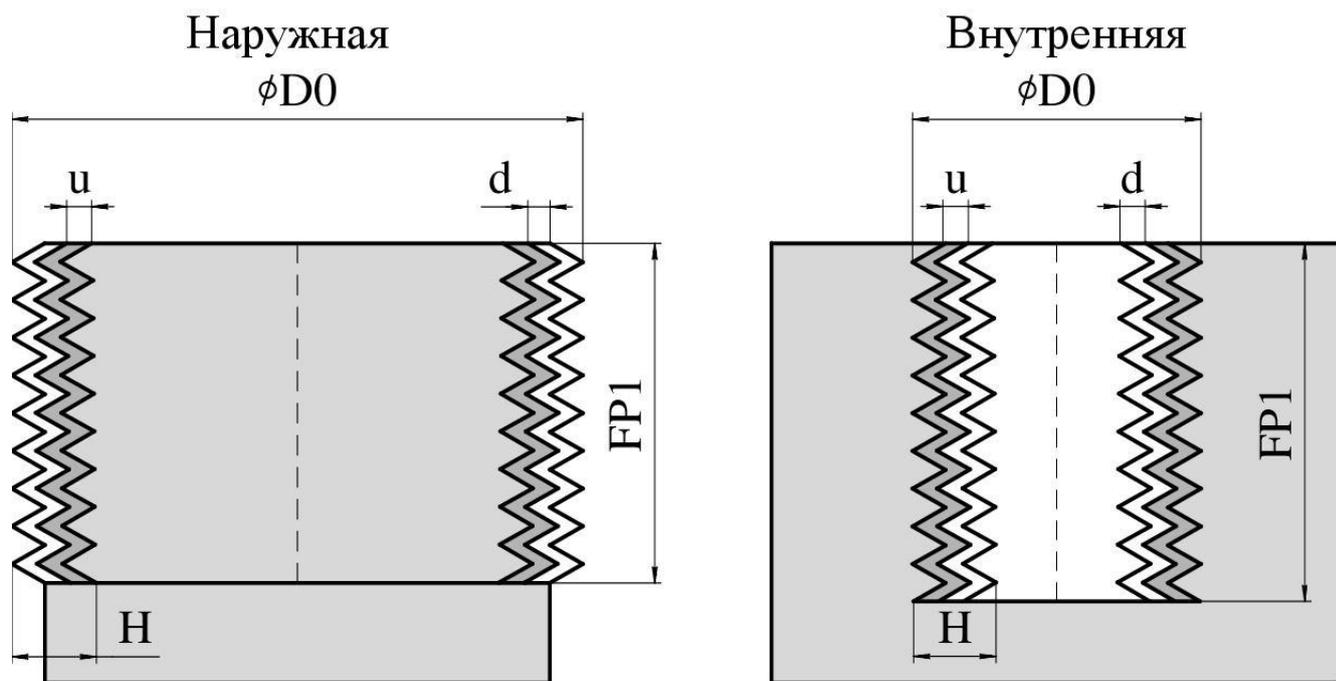


Рисунок 4.17 – Переменные цикла фрезерования резьбы

#### 4.4 Выводы по главе 4

1. Проведенный анализ существующих циклов с выявлением основных параметров, обеспечивающих формообразование и качество поверхностей, а также стратегию перемещений режущего инструмента в процессе работы циклов, позволяет сформулировать основы методики создания циклов механообработки и создать универсальные алгоритмы работы токарных и фрезерных циклов.
2. Разработанные циклы токарной обработки позволяют вести резание во всех квадрантах, что актуально для токарных станков, имеющих контр-шпиндель или вторую револьверную головку.
3. Разработанные циклы фрезерования позволяют производить обработку в прямых и повернутых плоскостях, что актуально для специализированного оборудования или специализированной оснастки.

## **Глава 5. Проверка инструментария разработки управляющих программ**

Исследование работоспособности разработанного инструментария осуществлялось посредством создания на нем управляющих программ для систем ЧПУ Fanuc, Siemens и АксиОМА Контрол и эмуляция разработанных управляющих программ с использованием специализированных программных и графических средств: Cimco Edit 8, Sinutrain for Sinumeric Operate v4.7 Lathe, АxiOMACtrlApplication.

Исследования включали и испытания по оценке времени редактирования управляющих программ с использованием разработанного инструментария на токарно-фрезерных станках ЧПУ Fanuc 0i и Siemens 840D по сравнению с временем редактирования управляющих программ на языке ISO-7Bit, разработанных с использованием CAD/CAM-систем NX-11 и Autodesk Fusion 360, а также с использованием диалоговых систем цехового уровня Fanuc ManualGuide и Siemens ShopTurn. Помимо классической подготовки была произведена разработка управляющих программ с использованием инструментария для мобильных устройств с ОС Android для проверки времени подготовки и редактирования управляющей программы в цеховых условиях без использования персонального компьютера.

### **5.1 Разработка управляющей программы тестовой детали в среде инструментария**

Для получения взвешенного результата с использованием нерепрезентативной выборки были подобраны определенные детали токарно-фрезерной обработки, подготовка управляющих программ 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. (Рисунке 5.1).

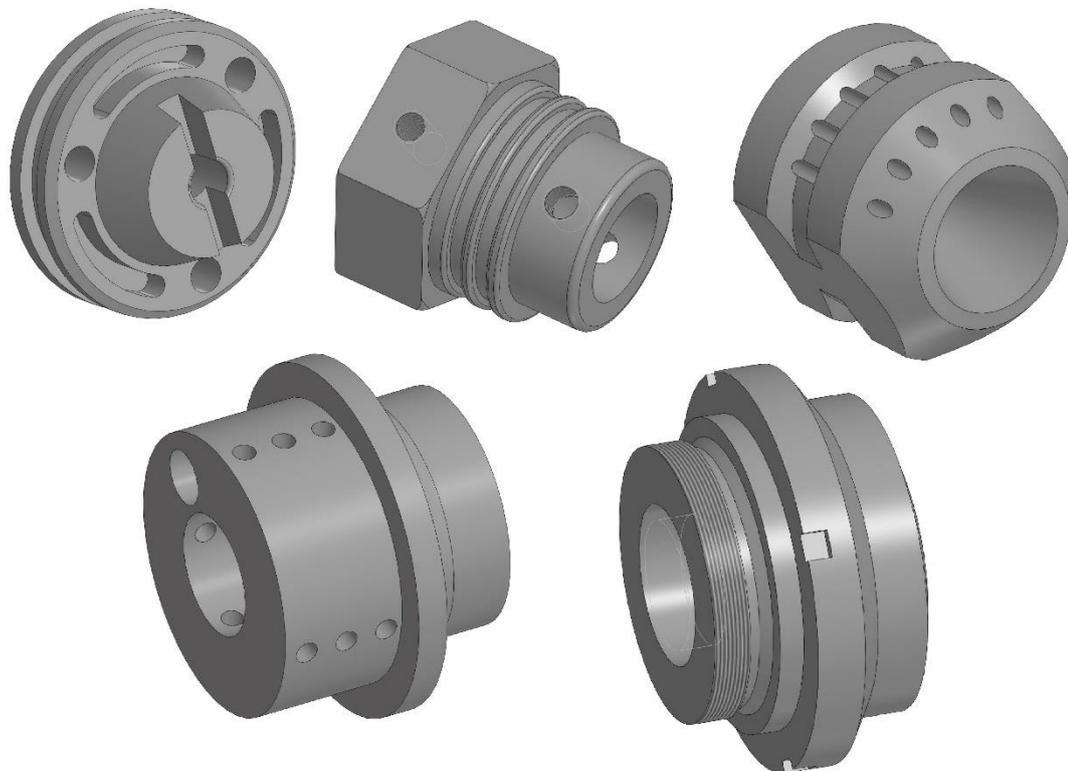


Рисунок 5.1 – Группа рассматриваемых деталей

В качестве примера представлен процесс разработки управляющей программы обработки одной из рассматриваемых деталей с использованием специализированного инструментария. Управляющие программы для изготовления тестовой детали «Крышка» (Рисунок 5.2) на токарно-фрезерных станках с ЧПУ Fanuc, Siemens и АксиОМА Контрол были подготовлены с использованием разработанного инструментария. Технологическая операция представлена в Таблице 5.1 последовательностью переходов (токарных, сверлильных и фрезерных) и набором инструментов, выполняющих данные переходы. В качестве заготовки используется цилиндрический пруток  $\varnothing 70$ , длиной 45 мм. Материал заготовки – алюминий ДТ16 ГОСТ 21488-97.

Для каждой рассматриваемой системы ЧПУ (Fanuc, Siemens, АксиОМА Контрол) предусмотрен ввод специализированных M-кодов для управления

вспомогательными узлами электроавтоматики: подача и остановка смазочно-охлаждающей жидкости или обдува воздухом, активация и остановка стружечного конвейера, открытие и закрытие уловителя деталей, активация и деактивация тормоза шпинделя, переключение шпинделя в режим интерполируемой оси и обратно в режим шпинделя, вращение приводного инструмента на токарно-фрезерном станке по часовой, против часовой и остановка вращения [84]. Если на станке узел электроавтоматики отсутствует или его работа осуществляется в ручном режиме с кнопки на пульте управления ЧПУ, то данное поле ввода М-кода принимает значение «0», а блоке «TOOLSET» поле включения/выключения узла принимает значение «Off».

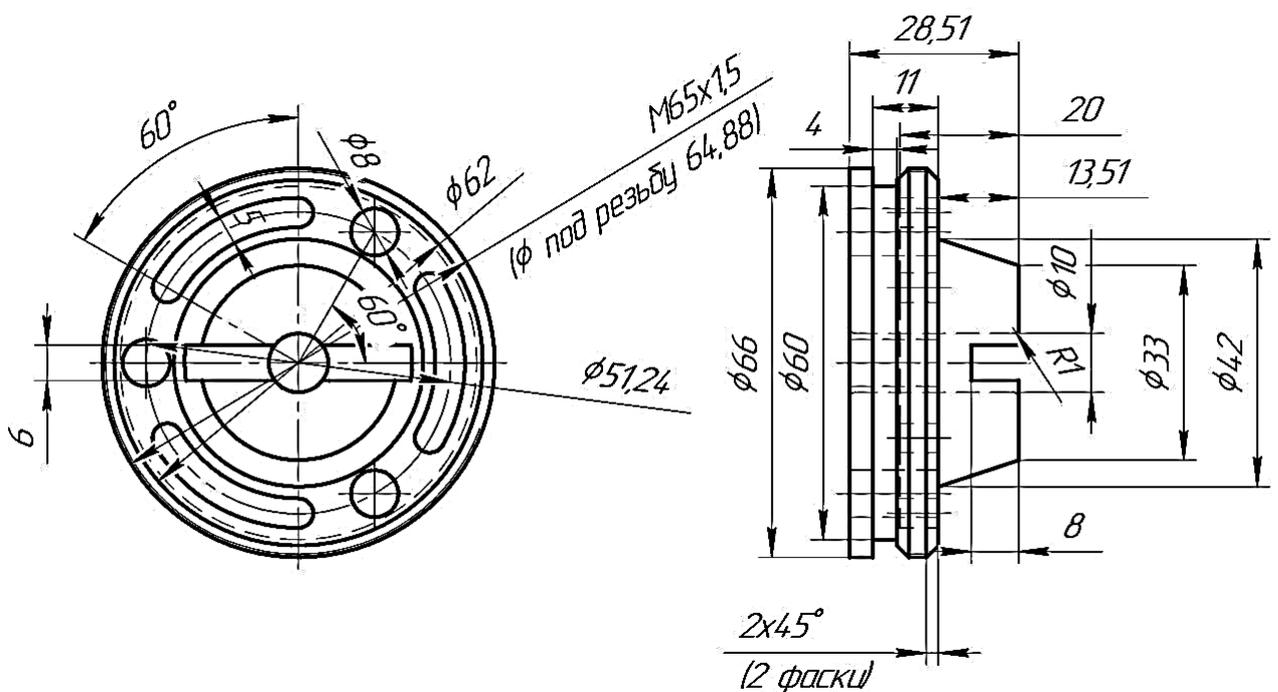


Рисунок 5.2 – Эскиз тестовой детали «Крышка»

Технологическая операция механической обработки, спроектированная в графическом интерфейсе инструментария, представлена в обезличенном виде (Приложение А). Текст управляющей программы в графическом интерфейсе инструментария представляет собой последовательность вызовов определенного порядка макропрограмм для системы ЧПУ Fanuc или функций для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол (Приложения А, Б, В) [85].

Таблица 5.1 – Последовательность технологических переходов операции механической обработки детали тела вращения «Крышка»

№ Пер	Технологический переход	Режущий инструмент
1	Точить торец в размер 44 мм	Проходной токарный резец с пластиной $r=0.8$ мм
2	Точить $\varnothing 66$ мм на длину 30 мм	
3	Точить $\varnothing 64,88$ мм на длину 20 мм	
4	Точить выступ $\varnothing 33$ мм, $\varnothing 42$ мм, 13.51 мм, фаску $2 \times 45^\circ$	
5	Точить канавку $\varnothing 60$ мм, 4 мм, фаску $2 \times 45^\circ$	Токарный резец для обработки канавок $b=3$ мм, $r=0.2$ мм
6	Точить резьбу M66x1.5 мм	Резьбовой токарный резец $r=0.1$ мм
7	Сверлить отверстие $\varnothing 9.5$ мм на длину 29 мм	Сверло $D=9.5$ мм, $A=140^\circ$
8	Расточить отверстие $\varnothing 10$ мм на длину 29 мм и R 1 мм	Расточной токарный резец $r=0.4$ мм
9	Фрезеровать продольный паз, выдерживая размеры W 6 мм, L 42 мм и $A_0 0^\circ$	Концевая фреза $D=4$ мм
10	Фрезеровать 3 кольцевых паза, выдерживая размеры W 5 мм, $\varnothing 51.24$ мм, $A_0 90^\circ$ , $A_2 60^\circ$	
11	Фрезеровать 3 круглых кармана, выдерживая размеры 8 мм, $\varnothing 51.24$ мм и $A_0=60^\circ$	
12	Отрезать деталь в размер 28.51 мм	Отрезной резец $b=2.5$ мм, $r=0.1$ мм

Файл управляющей программы в обезличенном виде, файл с М-кодами и файлы управляющих программ для рассматриваемых систем ЧПУ сохраняются автоматически в папке «Общие документы» в ОС Windows и папке «Documents» в ОС Android. Для всех разработанных управляющих программ сохраняется принцип последовательности вызываемых макропрограмм, для системы ЧПУ Fanuc макропрограммы имеют порядковые номера О6000-О6045, для систем ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол макропрограммы представлены функциями с заданием переменных. Для всех систем ЧПУ последовательность переменных при вызове макропрограмм сохраняется. Для системы ЧПУ АксиОМА Контрол первой строкой управляющей программы идет директива подключения разработанной библиотеки пользовательских макропрограмм #include "USERCYCLES/USERCYCLES.c" [86]. Последовательность заполнения инструментального магазина представлена картой наладки в Таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Карта наладки инструментального магазина станка

№ Тех. Пер.	Режущий инструмент			
	Номер позиции	Номер корректора	Ширина/ диаметр	Радиус/угол
1	1	1 (1)	0 мм	0.8 мм
2				
3				
4				
5	2	2 (1)	3 мм	0.2 мм
6	3	3 (1)	0 мм	0.1 мм
7	4	4 (1)	9.5 мм	140°
8	5	5 (1)	0 мм	0.4 мм
9	10	10 (1)	4 мм	0°
10				
11				
12	6	6 (1)	2.5 мм	0.1 мм

Одним из параметров инструмента является номер корректора, который в системе ЧПУ Fanuc называется «Корректор», количество корректоров для одного инструмента неограниченно; в тексте управляющей программы после операнда выбора инструментальной позиции «Т» корректор проставляется в виде 2-х последних цифр (Тххуу, где хх – номер позиции инструмента, уу-номер корректора) [87].

В системах ЧПУ Siemens и АксиОМА Контрол корректор называется «номер режущей кромки» и проставляется в тексте управляющей программы после символа D, количество задаваемых «режущих кромок» для одного инструмента не может быть больше 4 [88]. В системе ЧПУ Fanuc отсутствует детализированное описание режущего инструмента, поэтому траектории движения циклов строятся с использованием параметров инструментов, заданных через подготовительную макропрограмму технологического цикла [89]. В системе ЧПУ Siemens есть детализированный ввод данных режущего инструмента, параметры из таблиц передаются в управляющую программу с использованием команд \$TC\_DPх, где х принимает значение от 1 до 11 [90]. В системе ЧПУ АксиОМА Контрол параметры инструмента из таблицы передаются в управляющую программу с использованием команды GetTableTool для радиуса и длины [91].

## **6.2 Эмуляция обработки в системах ЧПУ**

**Эмуляция токарной обработки в системе ЧПУ Fanuc** произведена с использованием редактора УП Cimco Edit 8 с модулем Fanuc Turning G-code B, который поддерживает прямое программирование в диаметрах и работу с макрокодом (Рисунок 5.3). Эмуляция фрезерной обработки произведена с использованием редактора УП Cimco Edit 8 с модулем Fanuc Milling, который поддерживает режим программирования в полярных координатах с использованием осей А, В и С (Рисунок 5.4). Это обосновано тем, что модуль Fanuc

Turning G-code B не поддерживает фрезерную обработку и не переводит угловые перемещения оси шпинделя C в линейные перемещения виртуальной оси Y, а модуль Fanuc Milling не работает в режиме прямого программирования в диаметрах и корректно не отображает движения токарного инструмента [92].

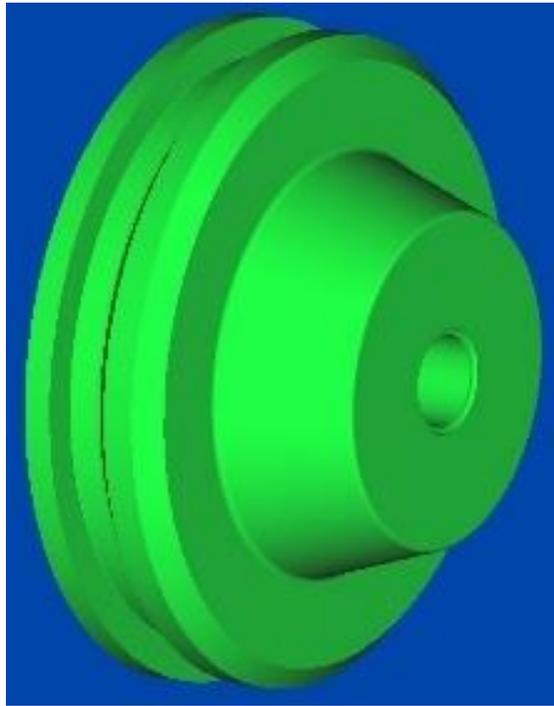


Рисунок 5.3 – Эмуляция токарной обработки в системе ЧПУ Fanuc



Рисунок 5.4 – Эмуляция фрезерной обработки в системе ЧПУ Fanuc

Для эмуляции обработки в управляющую программу были скопированы все разработанные циклы, разделенные друг от друга символом «%», предназначенным для обозначения начала каждой макропрограммы. Эмуляция кода управляющей программы осуществляется с использованием встроенного графического средства с отрисовкой исполняемых траекторий и поддержкой 3D-режима.

**Эмуляция токарной и фрезерной обработки в системе ЧПУ Siemens** произведена с использованием эмулятора Sinutrain for Sinumeric Operate v4.7 Lathe, который поддерживает работу прямого вызова циклов пользователя и визуализацию фрезерных циклов в токарной обработке с преобразованием осей (команда TRANSMIT для плоскости XY и TRACYL для плоскости XZ) [93]. Эмуляция обработки произведена с использованием встроенного графического средства с построением исполняемых траекторий представлена на Рисунке 5.5.

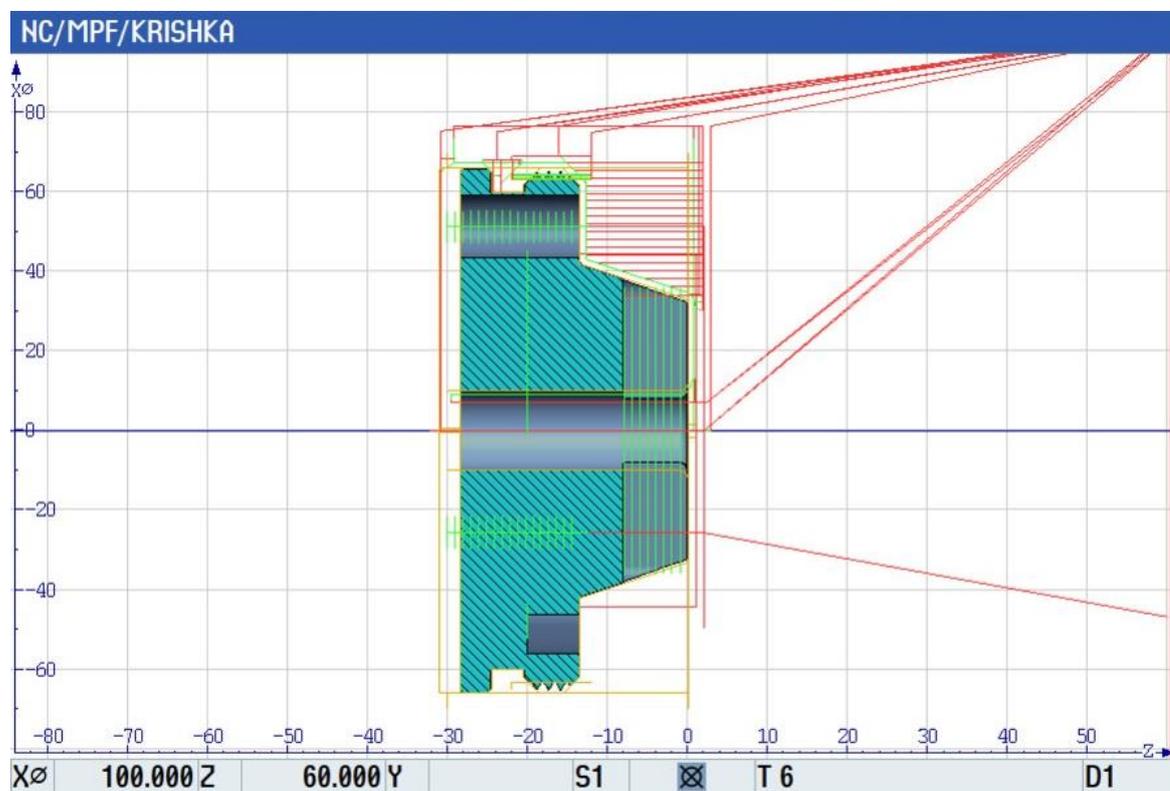
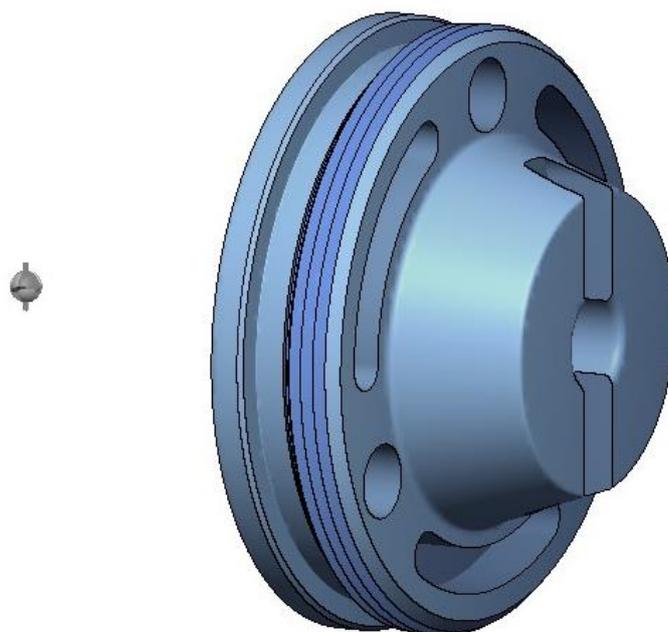


Рисунок 5.5 – Эмуляция обработки в системе ЧПУ Siemens в режиме траекторий

Заготовка для 3D-визуализации процесса обработки задается через встроенный цикл ЧПУ WORKPIECE ("CYLINDER",192,1,-45,-45,70) [94]. Эмуляция обработки произведена с использованием встроенного графического средства с поддержкой 3D-визуализации (Рисунок 5.6).

NC/MPF/KRISHKA



XØ	100.000 Z	60.000 Y	S1	<input checked="" type="checkbox"/>	T 6	D1
----	-----------	----------	----	-------------------------------------	-----	----

Рисунок 5.6 – Эмуляция обработки в системе ЧПУ Siemens в режиме 3D-визуализации

Эмуляция обработки в системе ЧПУ АксиОМА Контрол произведена с использованием эмулятора AxiOMACtrlApplication, который поддерживает работу вызова циклов пользователя из любой директории, созданной в корне системы ЧПУ. Заготовка для 3D-визуализации процесса обработки задается через встроенную директиву определения заготовки #workpiece [95]. Эмуляция кода управляющей программы осуществляется с использованием встроенного графического средства с отрисовкой исполняемых траекторий (Рисунок 5.7) и в 3D-режиме (Рисунок 5.8).

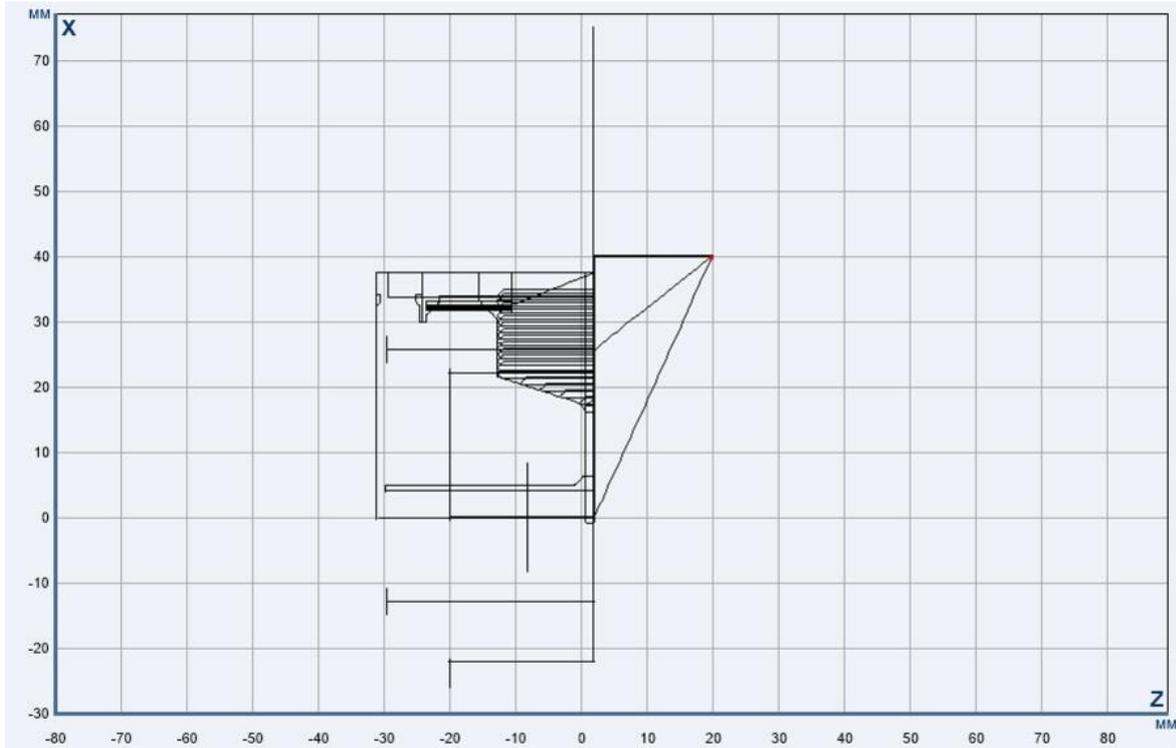


Рисунок 5.7 – Эмуляция обработки в системе АксиОМА Контрол в режиме траекторий

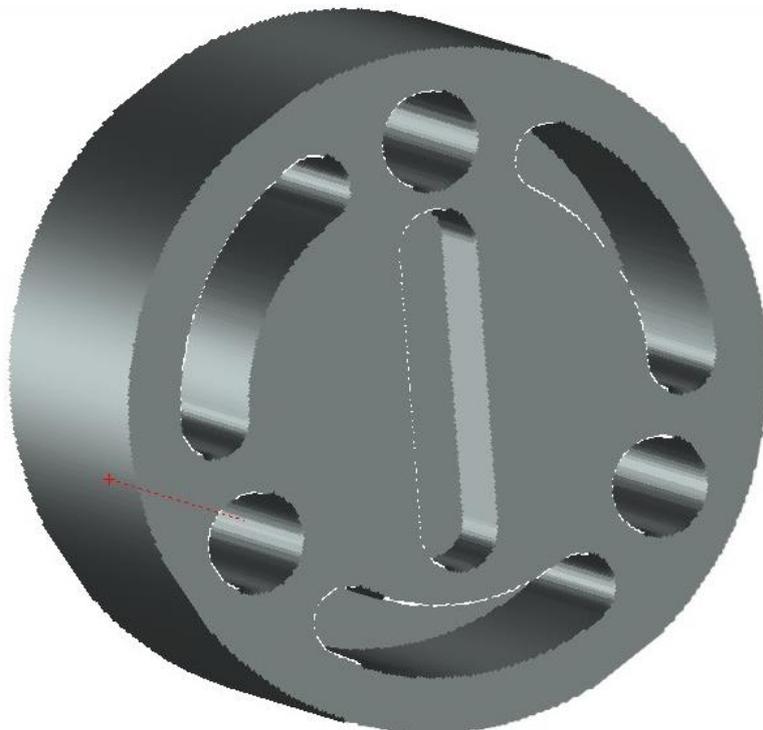


Рисунок 5.8 – Эмуляция обработки в системе АксиОМА Контрол в режиме 3D-визуализации

Текст управляющей программы в системе эмулятора AxiOMACtrlApplication имеет вид программы в коде языка высокого уровня системы ЧПУ. В начале управляющей программы используется активация библиотеки #include “USERCYCLES/USERCYCLES” со всеми вложенными циклами механообработки в созданной папке USERCYCLES в корне системы ЧПУ [96].

### **5.3 Сравнение результатов использования различных способов подготовки и редактирования управляющей программы**

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

Испытания производились на базе станочного парка производственного предприятия. Исходными условиями считаются: наличие чертежа, отсутствие 3D-модели, наличие CAD/CAM-системы с постпроцессорами для станков с системами ЧПУ Fanuc 0i, Siemens 840D и АксиОМА Контрол, наличие цифровых карт наладки для систем ЧПУ Fanuc, Siemens и АксиОМА Контрол. Результаты испытаний приведены в обобщенной Таблице 5.3.

Разработка тестовой детали токарно-фрезерной обработки велась с использованием разработанного инструментария, CAD/CAM-систем NX с постпроцессорами Fanuc и Siemens и АксиОМА Контрол, а также с использованием CAM-систем цехового уровня Siemens ShopTurn и Fanuc ManualGuide. Деталь представляет из себя набор типовых токарных и фрезерных элементов токарно-фрезерной обработки (с использованием угловой оси шпинделя

С), соответствующих циклам разработанного инструментария и САМ-систем цехового уровня.

Таблица 5.3 – Сравнительные результаты тестирования приложений для подготовки и внедрения в производство управляющих программ

Способ разработки УП	Специализир. инструментарий	CAD/CAM -система	Siemens ShopTurn	Fanuc ManualGuide
Время подготовки УП, мин	20	40	20	40
Время эмуляции УП в системе ЧПУ, мин	15 (5+5+5)	15 (5+5+5)	0	0
Время редактирования УП, мин	25	50	20	30
Время повторной эмуляции УП в системе ЧПУ	15 (5+5+5)	15 (5+5+5)	0	0
Общее время подготовки УП, мин	75	120	40	70
Итоговое время внедрения УП, мин	75	120	110	

Время разработки управляющей программы с использованием инструментария составило 20 минут для трех систем ЧПУ, не включая время эмуляции в системе ЧПУ. Время эмуляции УП в каждой системе ЧПУ составило 5 минут. Редактирование управляющей программы с использованием инструментария составила 25 минут.

Время разработки управляющей программы с использованием CAD/CAM-системы NX с постпроцессорами и виртуальными моделями станков, не включая

время эмуляции в системе ЧПУ, составило 40 минут для систем ЧПУ Fanuc, Siemens и АксиОМА Контрол. Для выполнения поставленной задачи требовалось разработать 3D-модель, назначить нулевую точку детали с учетом торцевого припуска, назначить обрабатываемые поверхности, выбрать стратегию обработки каждого перехода, сгенерировать код управляющей программы и произвести эмуляцию в CAD/CAM-системе. Время эмуляции УП в каждой системе ЧПУ составило 5 минут. Была смоделирована ситуация изменения размеров и технических требований чертежа, при которой потребовалась корректировка управляющей программы. Редактирование управляющей программы с использованием CAD/CAM-системы NX с постпроцессорами и виртуальными моделями станков составило 50 минут, так как потребовалась перестройка стратегии обработки, переназначение плоскостей отвода, замена технологических и геометрических переменных отдельных элементов обработки, эмуляция и генерация управляющей программы в CAD/CAM-системе.

Время разработки управляющей программы с использованием САМ-систем цехового уровня Siemens ShopTurn составило 20 минут, включая время эмуляции в системе ЧПУ. Редактирование управляющей программы с использованием САМ-систем цехового уровня Siemens ShopTurn составила 20 минут, включая время эмуляции, так как потребовалась корректировка плоскостей отвода инструмента, задаваемых непосредственно в токарном контуре.

Время разработки управляющей программы с использованием САМ-систем цехового уровня Fanuc ManualGuide составило 40 минут, включая время эмуляции в системе ЧПУ. Отличие трудоемкости при использовании двух диалоговых систем можно объяснить тем, что не все циклы, разработанные производителем Siemens ShopTurn, присутствуют в надстройке Fanuc ManualGuide, например, цикл фрезерования кольцевого паза представлен 3-мя циклами фрезерования контуров, а цикл многопроходного точения ступени представлен циклом точения контура. Редактирование управляющей программы с использованием САМ-систем цехового уровня Fanuc ManualGuide составила 30 минут, включая время эмуляции.

Расчет разницы времени подготовки и редактирования управляющей программы с использованием инструментария, CAD/CAM-систем и САМ-систем цехового уровня представлены в формулах 5.1, 5.2, 5.3 [97].

$$\Delta_{t1} = 100 - \frac{t_{ки}}{t_{сам}} \times 100 = 100 - \frac{75}{120} \times 100 = 38\% \quad (5.1)$$

$$\Delta_{t2} = 100 - \frac{t_{ки}}{t_{дс}} \times 100 = 100 - \frac{75}{110} \times 100 = 32\% \quad (5.2)$$

Среднее выборочное значение можно вычислить по формуле 5.3:

$$\Delta_{t_{cp}} = \frac{38+32}{2} = 35\% \quad (5.3)$$

Таким образом, данные результаты демонстрируют, что разработка и редактирование УП для обработки детали выполняется с использованием инструментария на 35% быстрее, чем с использованием CAD/CAM-системы и двух разных САМ-систем цехового уровня, то есть достигается снижение времени.

Необходимо учитывать, что общее время подготовки УП, созданных с использованием САМ-систем цехового уровня – это критический, но необходимый для рассмотрения в диссертационной работе случай производственной необходимости. Если сравнивать разработку УП с использованием инструментария и разработку на каждой системе цехового уровня по отдельности, то в данном конкретном случае результат будет в пользу систем цехового уровня (формулы 5.4, 5.5).

$$\Delta_{t21} = 100 - \frac{t_{ки}}{t_{дс1}} \times 100 = 100 - \frac{40}{75} \times 100 = 46,67\% \approx 47\% \quad (5.4)$$

$$\Delta_{t22} = 100 - \frac{t_{ки}}{t_{дс2}} \times 100 = 100 - \frac{70}{75} \times 100 = 6,67\% \approx 7\% \quad (5.5)$$

Расчет показывает, что использованием диалоговых систем цехового уровня по отдельности по сравнению с инструментарием быстрее: Siemens ShopTurn – на 47%, Fanuc ManualGuide – на 7%.

#### **5.4 Применение инструментария в учебном процессе**

Помимо прямого производственного назначения – подготовка и редактирование управляющих программ для обработки деталей с использованием не более 3-х осей, инструментарий можно использовать при подготовке специалистов, связанных с автоматизацией технологических процессов в машиностроении. С использованием фрагментов исходного кода инструментария учащимися магистратуры были разработаны циклы фрезерования резьбы и фрезерования зубьев звездочек цепных передач для систем ЧПУ Siemens, Fanuc и АксиОМА Контрол. Циклы полностью соответствуют концепции и принципу работы в рамках программного средства, имеют общую последовательность ввода переменных и соответствующее графическое сопровождение. Учащимися бакалавриата инструментарий использовался для проектирования выпускной квалификационной работы, связанной с автоматизацией технологических процессов, для подготовки управляющих программ в системе ЧПУ АксиОМА Контрол. Были разработаны управляющие программы для изготовления типовых деталей, имеющих большую вариативность исполнений: квадратных фланцев ГОСТ 12815-80, резьбовых втулок ГОСТ 12464-67, ниппелей ГОСТ 3124-77, штуцеров ГОСТ 16045-70.

### 5.5 Выводы по главе 5

1. Разработанный инструментарий позволяет запрограммировать комплексную токарно-фрезерную обработку в виде вызовов макропрограмм, при этом файл обработки позволяет быстро генерировать код управляющей программы для каждой из рассматриваемых систем ЧПУ при необходимости переноса управляющей программы с одной системы ЧПУ на другую.
2. Перенос управляющих программ с одной системы ЧПУ на другую с использованием инструментария не требует дальнейшей корректировки разработанной управляющей программы, что позволяет производить обработку одной детали на станках с разными системами ЧПУ.
3. Использование разработанного инструментария позволяет сократить время на внедрение управляющих программ в производство на 35% по сравнению с использованием САМ-систем и САМ-систем цехового уровня.

## Заключение

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 литературы

1. 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.
2. 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, №.4 – pp.1-6.
3. Martinov, G.M. Trends in the numerical control of machine-tool systems / G.M. Martinov, L.I. Martinova // Russian Engineering Research. Т.30. 2010, №10. – P.1041-1045.
4. Нежметдинов, Р.А. Подход к построению систем логического управления технологическим оборудованием для реализации концепции «Индустрия 4.0» / Р.А. Нежметдинов, П.А. Никишечкин, И.А. Ковалев, Н.Ю. Червоннова // Автоматизация в промышленности. 2017, №5. – С.5-9.
5. Селевцов, Л.И. Автоматизация технологических процессов: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Л. И. Селевцов, А. Л. Селевцов. - 3-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2014. – 352 с.
6. Рачков, М.Ю. Технические средства автоматизации: учебное пособие. - 2-е изд., стереотип / М.Ю. Рачков – М.: МГИУ, 2009. – 185 с.
7. Денисенко, В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием: учебное пособие / В.В. Денисенко – М.: Горячая Линия – Телеком, 2009. – 608 с.
8. Мартинов, Г.М. Анализ систем ЧПУ, представленных на Международной выставке «Металлообработка-Технофорум-2009», их новизна и особенности / Г.М. Мартинов, Л.И. Мартинова // Автоматизация в промышленности. – 2009. – №12. – С. 59-65.

9. Мартинов, Г.М. Развитие систем управления технологическими объектами и процессами / Г.М. Мартинов // Мир техники и технологий. – 2009. – № 6. – С.35.
10. Григорьев, С.Н. Проблемы, тенденции и перспективы развития систем числового программного управления технологических систем и комплексов / С.Н. Григорьев, Г.М. Мартинов // Автоматизация в промышленности. – 2013. – №5– С.5.
11. Мартинов, Г. М. Современные тенденции развития компьютерных систем управления технологического оборудования / Г.М. Мартинов // Вестник МГТУ "Станкин". – 2010. – №1. – С.119-125.
12. Григорьев, С.Н. Методы и инструментальные средства многоуровневой подготовки специалистов в области цифрового машиностроительного производства / С.Н. Григорьев, Г.М. Мартинов // Автоматизация в промышленности. – 2015. – №5. – С.4-8.
13. Берлинер, Э.М. САПР в машиностроении / Э.М. Берлинер, О.В. Таратынов. - М.: Форум, 2011. - 448 с.
14. Мартинов, Г.М. Принцип построения универсального интерпретатора языка программирования высокого уровня для систем ЧПУ / Г.М. Мартинов, А.И. Обухов, Р.Л. Пушков// Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – №6. - С.42.
15. Мартинов, Г.М. Метод декомпозиции и синтеза современных систем с ЧПУ / Г.М. Мартинов, Н.В. Козак, Р.А. Нежметдинов, А.С. Григорьев, А.И. Обухов, Л.И. Мартинова // Автоматизация в промышленности. – 2013. – № 5. – С. 9-15.
16. Пушков, Р.Л. Разработка средств визуализации и контроля движения режущего инструмента для станков с ЧПУ / Р.Л. Пушков, П.А. Никишечкин // Тезисы XI Международной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2011)". - 2011. - С.47.
17. Нежметдинов, Р.А. Построение специализированной системы ЧПУ для многокоординатных токарно-фрезерных обрабатывающих центров / Р.А.

Нежметдинов, Р.Л. Пушков, С.В. Евстафиева, Л.И. Мартинова // Автоматизация в промышленности. – 2014. – №6. – С.25-28.

18. Siemens.com [электронный ресурс]: – Режим доступа: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/761/57038761/att\\_76020/v1/PGA\\_0911\\_en\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/761/57038761/att_76020/v1/PGA_0911_en_en-US.pdf) (дата обращения 28.11.2021).

19. Евстафиева, С.В. Разработка аппаратных компонентов системы ЧПУ с использованием современных САПР / С.В. Евстафиева, А.В, Лукьянов, Л.И. Мартинова, Р.Л. Пушков // Автоматизация в промышленности. – 2014. – №9. – С.35-39.

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

21. Калинин, А.А. Разработка моделей пространственнoсложных связанных поверхностей для программирования обработки на станках с ЧПУ. Диссертация кандидата технических наук. Москва, 2007. - 129 с.

22. Епифанова, О.В. Управление качеством процесса подготовки управляющих программ для оборудования с ЧПУ на основе выбора стратегий и средств автоматизации. Диссертация кандидата технических наук. Тула, 2012. - 132 с.

23. Моцаков, С.А. Управление качеством подготовки управляющих программ для металлорежущих станков с ЧПУ. Диссертация кандидата технических наук. Тула, 2010. - 177 с.

24. Шамов, С.А. Автоматизация подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ в условиях информационно-технологической среды. Диссертация кандидата технических наук. Москва, 2011. - 114 с.

25. Распутнис, В.Д. Инструментальные средства разработки диалога в системах ЧПУ. Диссертация кандидата технических наук. Москва, 1989. - 216 с.

26. Бовкун, А.В. Постпроцессор транслятора языка программирования высокого уровня для реконфигурируемых вычислительных систем. Диссертация кандидата технических наук. Таганрог, 2016. - 222 с.
27. Kumar, K. Canned Cycle. / C. Ranjan, J. Davim // In: CNC Programming for Machining. Materials Forming, Machining and Tribology. Springer, Cham. 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-41279-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-41279-1_9)
28. Селяков, М.Ю. Отечественные и зарубежные CAD/CAM системы // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 7. – С. 193-197;
29. Omirou, S. A new CNC turning canned cycle for revolved parts with free-form profile. / S. Rossides, A. Lontos // International Journal of Advanced Manufacturing Technology - Int J adv technol. 2012. 60. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3586-x>.
30. Ловыгин, А. А. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система / А.А. Ловыгин, Л.В. Теверовский. - М.: ДМК Пресс, 2015. – 280 с.
31. Беднаржевский, В.С. Обзор CAD/CAM/CAE-систем в энергомашиностроении [Текст]: учеб. пособие / В.С. Беднаржевский — М.: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2009. — 26 с.
32. Бунаков, П.Ю. Станок с ЧПУ. От модели до образца [Текст]: учеб. пособие / П.Ю. Бунаков, Э.В. Широких — М.: ДМК Пресс, 2017. — 120 с.
33. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) [Текст]: учеб. / К. Ли [Пер. с англ.: А. Вахитов, Д. Солнышков]. — СПб. и др.: Питер, 2004. - 559 с.
34. Официальный сайт фирмы «Fanuc» [электронный ресурс]: офиц. сайт // компания «Fanuc». – Режим доступа: <http://www.fanuc.eu/ch/en> (дата обращения 20.08.2021).
35. Kumar, K., (2020). Do Loop Cycle. / C. Ranjan, J. Davim // In: CNC Programming for Machining . Materials Forming, Machining and Tribology. Springer, Cham. 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-41279-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-41279-1_10)

36. Официальный сайт фирмы «Siemens» [электронный ресурс]: офиц. сайт // компания «Siemens». – Режим доступа: <https://www.siemens.com/global/en.html> (дата обращения 30.08.2021).
37. Малюх, В. Н. Введение в современные САПР: Курс лекций. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 192 с.
38. 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.
39. Пушков, Р.Л. Применение препроцессора языка высокого уровня систем ЧПУ для обработки сложных контуров / Р.Л. Пушков, А.И. Обухов // Материалы X Международной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2010)". – 2010. – С.213-216.
40. Пушков, Р.Л. Практические аспекты применения языка высокого уровня в системе ЧПУ для реализации групповой обработки / Р.Л. Пушков, Е.В. Саламатин, С.В. Евстафиева // Автоматизация в промышленности. – 2018. – №5. – С.31-34.
41. 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
42. 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. Институт проблем упр. им. В.А. Трапезникова. Электрон. текстовые дан. М.: ИПУ РАН. – 2017. С.94-98

43. Planetacam.ru [электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.planetacam.ru/college/learn/10-3/> (дата обращения 23.11.2021).
44. Система ЧПУ «АксиОМА Контрол» 2010-2020 Расширенное программирование (Версия 1.0.12). 2020.
45. Программирование для системы ЧПУ Fanuc 0i: учебное пособие / А.С. Александров, Д.В. Васильков, В.В. Голикова. Балт. гос. техн. ун-т – СПб., 2019. – 142 с.
46. Siemens Sinumerik 828D/840DsL. Руководство по программированию. Расширенное программирование (версия 09.01). 2018
47. 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 (2021) ICMTMTE 2021. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202134603098>
48. Мартинова, Л.И. Инструментарий поддержки процесса отладки многофункциональных систем ЧПУ / Л.И. Мартинова, И.А. Ковалев, А.В. Комаров // Тезисы 13-й Международной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2013), Москва, 15-17 октября 2013. с.67.
49. Мартинова, Л.И. Практические аспекты применения отечественной многофункциональной системы ЧПУ ""АксиОМА Контрол" / Л.И. Мартинова, Н.В, Козак, Р.А. Нежметдинов, Р.Л. Пушков, А.И. Обухов // Автоматизация в промышленности. - 2012. - №5. - С.36-40.
50. Мартинов, Г.М. Построение инструментария отладки управляющих программ систем ЧПУ на языках высокого уровня / Г.М. Мартинов, Р.Л. Пушков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2008. - №11. - С. 19-24.
51. Пушков, Р.Л. Практические аспекты построения многотерминального человеко-машинного интерфейса на примере системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» / Р.Л. Пушков, С.В. Евстафиева, С.В. Соколов, Р.А. Абдуллаев, П.А. Никишечкин,

- А.У. Кулиев, А.Е. Сорокоумов // Автоматизация в промышленности. – 2013. – №5. – С.37-41.
52. Нежметдинов, Р.А. Расширение функциональных возможностей систем ЧПУ для управления механо-лазерной обработкой / Р.А. Нежметдинов, С.В. Соколов, А.И. Обухов, А.С. Григорьев // Автоматизация в промышленности. – 2011. – №05. – С.49-53.
53. Григорьев, С.Н. Концепция построения базовой системы числового программного управления мехатронными объектами / С.Н. Григорьев, Г.М. Мартинов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2011. – №2. – С.21-27. 149
54. Мартинова, Л.И. Автоматизация процесса тестирования многофункциональных систем ЧПУ / Л.И. Мартинова, И.А. Ковалев, А.В. Комаров // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции "Компьютерная интеграция производства и ИПИ - технологии". с.66-74.
55. 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.
56. Григорьев, С.Н. Перспективы развития кроссплатформенных компьютерных систем числового программного управления высокотехнологичного оборудования / С.Н. Григорьев, А.Г. Андреев, Г.М. Мартинов // Автоматизация в промышленности. – 2011. – №5. – С.3-8.
57. Мартинов, Г.М. Разработка средств визуализации и отладки управляющих программ для электроавтоматики, интегрированных в систему ЧПУ / Г.М. Мартинов, Р.А. Нежметдинов, П.А. Никишечкин // Вестник МГТУ «Станкин». – 2012. – №4. – С. 87-92.

58. FireMonkey Quick Start Guide - Introduction [электронный ресурс]: – Режим доступа:

[https://docwiki.embarcadero.com/RADStudio/Alexandria/en/FireMonkey\\_Quick\\_Start\\_Guide\\_-\\_Introduction](https://docwiki.embarcadero.com/RADStudio/Alexandria/en/FireMonkey_Quick_Start_Guide_-_Introduction) (дата обращения 18.01.2022).

59. Stackoverflow.com [электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://stackoverflow.com/questions/51142336/how-do-i-create-a-delphi-class-library> (дата обращения 30.01.2022).

60. Stackoverflow.com [электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://stackoverflow.com/questions/9964483/delphi-select-object-by-unknown-class-type> (дата обращения 10.02.2022).

61. docwiki.embarcadero.com [электронный ресурс]: – Режим доступа: [https://docwiki.embarcadero.com/RADStudio/Sydney/en/Classes\\_and\\_Objects\\_\(Delphi\)](https://docwiki.embarcadero.com/RADStudio/Sydney/en/Classes_and_Objects_(Delphi)) (дата обращения 17.02.2022).

62. Wikipedia.org [электронный ресурс]: – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Принцип\\_разделения\\_интерфейса](https://ru.wikipedia.org/wiki/Принцип_разделения_интерфейса) (дата обращения 23.02.2022).

63. Martinov, G.M. Method of decomposition and synthesis of the custom CNC systems / G.M. Martinov, N.V. Kozak, R.A. Nezhmetdinov, A.S. Grigoriev, A.I. Obukhov, L.I. Martinova // Automation and Remote Control. March. – 2017. – №78, Issue 3. – P.525-536.

64. Мартинов, Г.М. Подход к реализации аппаратно-независимого управления электроавтоматикой токарных и токарно-фрезерных станков с ЧПУ / Г.М. Мартинов, Р.А. Нежметдинов, А.У. Кулиев // Авиационная техника. – 2016. – №2. – С.128-131

65. Abbas, A. Enhanced CNC Machines Capabilities by Adding Circular Patterns Cycle. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2012. <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0230-0>

66. 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.

67. Chpu.net [электронный ресурс]: – Режим доступа: [http://www.chpu.net/sites/default/files/content/chpu/files/parametricheskoe\\_programmirovanie.pdf](http://www.chpu.net/sites/default/files/content/chpu/files/parametricheskoe_programmirovanie.pdf) (дата обращения 15.03.2022).

68. Habr.com [электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/472206/> (дата обращения 25.03.2022)

69. Multicut.ru [электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.multicut.ru/articles/privyazka-instrumenta-na-stankakh-s-chpu/> (дата обращения 12.04.2022).

70. Аверченков, В. И. Автоматизация подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ. Часть 1 / В.И. Аверченков. - М.: ФЛИНТА, 2019. - 55 с.

71. Балла, О.М. Инструментообеспечение современных станков с ЧПУ. Учебное пособие / О.М. Балла. - М.: Лань, 2017. - 91 с.

72. Ben, M. Cycle Time and Hole Quality in Drilling Canned Cycle. / M. Ben, H. Khlifi, B. Gassara, M. Baili, G. Dessenin, W. Bouzid // Advances in Mechanical Engineering and Mechanics. CoTuMe 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19781-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19781-0_11)

73. Проектирование автоматизированных станков и комплексов: Учебник: В 2 т. Т.2 / Под ред. П.М. Чернянского. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 303 с.

74. Мартинов, Г.М. Подход к реализации аппаратно-независимого управления электроавтоматикой токарных и токарно-фрезерных станков с ЧПУ / Г.М. Мартинов, Р.А. Нежметдинов, А.У. Кулиев // Авиационная техника. – 2016. – №2. С.128-131.

75. Lee, J. Cyber physical systems for predictive production systems. / J. Lee, C. Jin, B. Bagheri // Prod. Eng. Res. Devel. 11, 155–165 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11740-017-0729-4>

76. Лурье, А.И. Аналитическая механика – М.: Физматлит -1961 г. – 824 с.

77. Ведерников, Ю.А. Системы управления станками с ЧПУ (СУСЧПУ). Методические указания. - Набережные Челны: изд-во КамПИ,ИНЭКА, 2005. - 58 с.
78. Гурьянихин, В.Ф. Автоматизированная подготовка управляющих программ для станков с ЧПУ: Учебное пособие к практическим и лабораторным работам. / В.Ф. Гурьянихин, М.Н. Булыгина // Ульяновск: УлГТУ, 2001.-88 с. ISBN 5-89146-251-6
79. Мартинова, Л.И. Решение задач синхронизации и точного позиционирования осей в системе ЧПУ / Л.И. Мартинова, Р.Л. Пушков Р.Л., Н.В. Козак, Е.С. Трофимов// Автоматизация в промышленности. - 2011. - №5. - С.30-35.
80. 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). Москва. - 2012. - С.66.
81. Система ЧПУ «АксиОМА Контрол» Руководство программиста по созданию управляющих программ (Рабочая версия 6.7.12)
82. Тишенина, Т.И., Фёдоров, Б.В. Токарные станки и работы на них. - М.: Машиностроение, 2002. – 144 с.
83. Вереина, Л.И. Технология фрезерной обработки. Учебное пособие / Л.И. Вереина - М.: Феникс, 2017. - 532 с.
84. Лавров, Г.И. Организация и оперативное планирование производства: Учебное пособие. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – 111 с.
85. 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.
86. Андреев, Г. И. Работа на токарных станках с ЧПУ с системой ЧПУ FANUC / Г. И. Андреев. - СПб, 2005. - 42 с.

87. Козак, Н.В. Обеспечение точности установки заготовок на станках с ЧПУ в автоматизированных производствах / Н.В. Козак, Л.И. Мартинова, А.В. Стась // Автоматизация в промышленности, №5. - 2019. - С.17-21.
88. Автоматы продольного точения с ЧПУ [Электронный ресурс] / ЗАО «ИРЛЕН-инжиниринг». - СПб., 2005. - Режим доступа: [www.irlen.ru](http://www.irlen.ru).
89. Высокоточные обрабатывающие станки с ЧПУ [Электронный ресурс] / Copyright ЗАО «М.Т.Е. ФИНАНС». - М., 2005. - Режим доступа: <http://www.mtef.ru/catalog/CPU>.
90. Мартинова, Л.И. Разработка постоянных циклов токарной обработки / Л.И. Мартинова, С.Ю. Цай // Вестник МГТУ "Станкин", №4. - 2021 - С.8-12.
91. Нежметдинов, Р.А. Числовое программное управление фрезерными обрабатывающими центрами с использованием высокоскоростных протоколов связи / Р.А. Нежметдинов, Р.Л. Пушков, А.Б. Любимов, Л.И. Мартинова, С.В. Евстафиева // Автоматизация в промышленности, №5. – 2015. - с.24-26.
92. Martinova, L.I. Diagnostics and forecasting of cutting tool wear at CNC machines. / L.I. Martinova, A.S. Grigoryev, S.V. Sokolov // Automation and Remote Control, 2012, Vol. 73, No. 4, pp. 742–749. <https://doi.org/10.1134/S0005117912040133>
93. Официальный сайт фирмы «Cimco» [электронный ресурс]: офиц. сайт // компания «Cimco». – Режим доступа: <https://www.cimco.com/ru/software/cimco-edit/documentation/> (дата обращения 11.01.2022).
94. SINUMERIK Operate SinuTrain Учебное пособие по фрезерной обработке с ShopMill (12/2018, Russian)
95. SINUMERIK Operate SinuTrain Учебное пособие по токарной обработке с ShopTurn (11/2018, Russian)
96. Пушков, Р.Л. Разработка параметрического цикла обработки деталей типа тела вращения со сложным профилем / Р.Л. Пушков, С.В. Евстафиева, А.Э. Седьмов // Вестник МГТУ "Станкин", №3(62). - 2022. - с.13-22.

97. Мартинова, Л.И. Автоматизация операционного контроля на фрезерных станках с ЧПУ / Л.И. Мартинова, А.В. Стась, А.С. Григорьев, М.С. Бабин // Автоматизация в промышленности, №5. - 2017. - с.33-36
98. Islam, M.N. Effect of Canned Cycles on Drilled Hole Quality. / M.N. Islam, N.H. Rafai, C. Phaopahon // Electronic Engineering and Computing Technology. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 60. Springer, Dordrecht. 2010. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-8776-8\\_53](https://doi.org/10.1007/978-90-481-8776-8_53).

## Приложения А. Управляющая программа в графическом интерфейсе инструментария в обезличенном виде

• TURN MILL NC EDITOR

	PROGRAM			
	WORKSET			
	TOOLSET TURNING			
	STOCK REMOVAL, EXTERNAL, FINISH, CROSS, X2Z2			Переход 1
	STOCK REMOVAL, EXTERNAL, ROUGH, LONGITUDINAL, X2Z2			Переход 2
	STOCK REMOVAL, EXTERNAL, ROUGH, LONGITUDINAL, X2Z2			Переход 3
	STOCK REMOVAL, EXTERNAL, ROUGH, LONGITUDINAL, X2Z2			Переход 4
				

Fanuc Mate

• TURN MILL NC EDITOR

	TOOLSET TURNING			
	GROOVING, EXTERNAL, ROUGH, CYLINDRICAL			Переход 5
	TOOLSET TURNING			
	THREADING, EXTERNAL, ROUGH, CYLINDRICAL			Переход 6
	TOOLSET TURNING			
	CENTER DRILLING, CHIPBREAKING, TIP			Переход 7
	TOOLSET TURNING			
				

Fanuc Mate

TURN MILL NC EDITOR

  	TOOLSET TURNING			Переход 8
	STOCK REMOVAL, INTERNAL, FINISH, LONGITUDINAL, X2Z2			
	TOOLSET MILLING			Переход 9
	ONE POINT			
	LONGITUDINAL SLOT, XY, ROUGH, COUNTER			
	CIRCLE			Переход 10
CIRCUMFERENTIAL SLOT, XY, ROUGH, COUNTER				

Fanuc Mate

TURN MILL NC EDITOR

  	CIRCLE			Переход 11
	CIRCUMFERENTIAL SLOT, XY, ROUGH, COUNTER			
	CIRCLE			
	CIRCULAR POCKET, XY, ROUGH, COUNTER			Переход 12
	TOOLSET TURNING			
	PART OFF			
PROGRAM END				

Fanuc Mate

**Приложения Б. Листинг кода управляющей программы обработки типовой детали для системы ЧПУ Fanuc**

```

Fanuc Mate
%
O0000(KRISHKA)
(WORKSET) G65 P6000 A0 B2000 C75 D8 E5 F2 H1 I150 J100 K100
(MCODES) G65 P6001 A8 B9 C14 D15 E18 F19 H38 I39 J28 K29 M113 Q114 R115
(TOOLSET) G65 P6002 A1 B1 C1 D0 E0.8 F0 H0.1 F0 I130 J0 K0 M1 Q1 R1
(STOCKREMOVAL) G65 P6041 A0 B0 C0 D0 E1 F0 H0 I70 J1 K36.6 M-1 Q36.6 R-1 S0 T0 U0 V0 W0 X0
(STOCKREMOVAL) G65 P6041 A0 B0 C0 D0 E1 F0 H0 I70 J0 K2 M-30 Q2 R-30 S0 T0 U0 V0 W0 X0
(STOCKREMOVAL) G65 P6041 A0 B0 C0 D0 E1 F0 H0 I64.88 J0 K15.94 M-13.51 Q11.44 R-13.51 S0 T0.5
(TOOLSET) G65 P6002 A1 B2 C2 D3 E0.1 F0 H0.05 F0 I80 J0 K0 M1 Q1 R1
(GROOVING) G65 P6042 A0 B0 C0 D1 E0 F0 H66 I-20.51 J0 K-4 M0 Q60 R0 S0 T0 U0 V2 W0.1 X0.1 Y0
(TOOLSET) G65 P6002 A1 B3 C3 D0 E0.1 F0 H1.5 F1 I1500 J0 K0 M1 Q1 R1
(THREADING) G65 P6044 A0 B0 C0 D0.1 E0.5 F0.02 H65 I-11 J-13 K0 M65 Q1.5 R0.92 S60
(TOOLSET) G65 P6002 A1 B4 C4 D9.5 E140 F0 H0.05 F1 I1300 J0 K0 M1 Q1 R1
(CENTERDRILLING) G65 P6046 A0 B1 C5 D3 E0 F0 H2 I-31
(TOOLSET) G65 P6002 A1 B5 C5 D0 E0.4 F0 H0.1 F0 I130 J0 K0 M1 Q1 R1
(STOCKREMOVAL) G65 P6041 A1 B1 C0 D0 E1 F0 H0 I9.5 J0 K0.5 M30 Q0.5 R30 S1 T1 U0 V0 W0 X0
(TOOLSET) G65 P6002 A1 B10 C10 D4 E130 F0 H0.05 F1 I1300 J0 K0 M1 Q1 R1
(LONGITUDINALSLOT) G65 P6024 A3 B0 C0 D1.5 E1 F0 H0 I0 J-8 K29 M6 Q0
(CIRCLE) G65 P6008 A0 B0 C3 D30 E25.62
(CIRCUMFERENTIALSLOT) G65 P6025 A3 B0 C0 D1.5 E1 F0 H0 I-13.51 J-6.49 K5 M60
(CIRCLE) G65 P6008 A0 B0 C3 D0 E25.62
(CIRCULARPOCKET) G65 P6027 A3 B0 C0 D1.5 E1 F0 H0 I-13.51 J-16 K8
(TOOLSET) G65 P6002 A1 B6 C6 D2.5 E0.1 F0 H0.05 F1 I800 J0 K0 M1 Q1 R1
(PARTOFF) G65 P6045 A66 B-28.51 C0 D-0.5 E1 F0.5 H0 I40 J300 K0.05
M30

```

**Приложения В. Листинг кода управляющей программы обработки типовой детали для системы ЧПУ Siemens**

Siemens

```
WORKSET(0, 2000, 75, 8, 5, 2, 1, 150, 100, 100)
MCODES(8, 9, 14, 15, 18, 19, 38, 39, 28, 29, 113, 114, 115)
TOOLSET(1, 1, 1, 0, 0.8, 0, 0.1, 0, 130, 0, 0, 1, 1, 1)
STOCKREMOVAL(0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 70, 1, 36.6, -1, 36.6, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
STOCKREMOVAL(0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 70, 0, 2, -30, 2, -30, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
STOCKREMOVAL(0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 64.88, 0, 15.94, -13.51, 11.44, -13.51, 0, 0.5, 0, 0, 0, 2)
TOOLSET(1, 2, 2, 3, 0.1, 0, 0.05, 0, 80, 0, 0, 1, 1, 1)
GROOVING(0, 0, 0, 1, 0, 0, 66, -20.51, 0, -4, 0, 60, 0, 0, 0, 0, 2, 0.1, 0.1, 0, 0.5)
TOOLSET(1, 3, 3, 0, 0.1, 0, 1.5, 1, 1500, 0, 0, 1, 1, 1)
THREADING(0, 0, 0, 0.1, 0.5, 0.02, 65, -11, -13, 0, 65, 1.5, 0.92, 60)
TOOLSET(1, 4, 4, 9.5, 140, 0, 0.05, 1, 1300, 0, 0, 1, 1, 1)
CENTERDRILLING(0, 1, 5, 3, 0, 0, 2, -31)
TOOLSET(1, 5, 5, 0, 0.4, 0, 0.1, 0, 130, 0, 0, 1, 1, 1)
STOCKREMOVAL(1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 9.5, 0, 0.5, 30, 0.5, 30, 1, 1, 0, 0, 0, 0)
TOOLSET(1, 10, 10, 4, 130, 0, 0.05, 1, 1300, 0, 0, 1, 1, 1)
LONGITUDINALSLOT(3, 0, 0, 1.5, 1, 0, 0, 0, -8, 29, 6, 0)
CIRCLE(0, 0, 3, 30, 25.62)
CIRCUMFERENTIALSLOT(3, 0, 0, 1.5, 1, 0, 0, -13.51, -6.49, 5, 60)
CIRCLE(0, 0, 3, 0, 25.62)
CIRCULARPOCKET(3, 0, 0, 1.5, 1, 0, 0, -13.51, -16, 8)
TOOLSET(1, 6, 6, 2.5, 0.1, 0, 0.05, 1, 800, 0, 0, 1, 1, 1)
PARTOFF(66, -28.51, 0, -0.5, 1, 0.5, 0, 40, 300, 0.05)
M30
```

**Приложения Г. Листинг кода управляющей программы обработки типовой детали для системы ЧПУ АксиОМА Контрол**

AxiOMA Ctrl

```
#include "USERCYCLES/USERCYCLES.c"
WORKSET(0, 2000, 75, 8, 5, 2, 1, 150, 100, 100);
MCODES(8, 9, 14, 15, 18, 19, 38, 39, 28, 29, 113, 114, 115);
TOOLSET(1, 1, 1, 0, 0.8, 0, 0.1, 0, 130, 0, 0, 1, 1, 1);
STOCKREMOVAL(0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 70, 1, 36.6, -1, 36.6, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
STOCKREMOVAL(0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 70, 0, 2, -30, 2, -30, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
STOCKREMOVAL(0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 64.88, 0, 15.94, -13.51, 11.44, -13.51, 0, 0.5, 0, 0, 0, 2);
TOOLSET(1, 2, 2, 3, 0.1, 0, 0.05, 0, 80, 0, 0, 1, 1, 1);
GROOVING(0, 0, 0, 1, 0, 0, 66, -20.51, 0, -4, 0, 60, 0, 0, 0, 2, 0.1, 0.1, 0, 0.5);
TOOLSET(1, 3, 3, 0, 0.1, 0, 1.5, 1, 1500, 0, 0, 1, 1, 1);
THREADING(0, 0, 0, 0.1, 0.5, 0.02, 65, -11, -13, 0, 65, 1.5, 0.92, 60);
TOOLSET(1, 4, 4, 9.5, 140, 0, 0.05, 1, 1300, 0, 0, 1, 1, 1);
CENTERDRILLING(0, 1, 5, 3, 0, 0, 2, -31);
TOOLSET(1, 5, 5, 0, 0.4, 0, 0.1, 0, 130, 0, 0, 1, 1, 1);
STOCKREMOVAL(1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 9.5, 0, 0.5, 30, 0.5, 30, 1, 1, 0, 0, 0, 0);
TOOLSET(1, 10, 10, 4, 130, 0, 0.05, 1, 1300, 0, 0, 1, 1, 1);
LONGITUDINALSLOT(3, 0, 0, 1.5, 1, 0, 0, 0, -8.29, 6, 0);
CIRCLE(0, 0, 3, 30, 25.62);
CIRCUMFERENTIALSLOT(3, 0, 0, 1.5, 1, 0, 0, -13.51, -6.49, 5, 60);
CIRCLE(0, 0, 3, 0, 25.62);
CIRCULARPOCKET(3, 0, 0, 1.5, 1, 0, 0, -13.51, -16, 8);
TOOLSET(1, 6, 6, 2.5, 0.1, 0, 0.05, 1, 800, 0, 0, 1, 1, 1);
PARTOFF(66, -28.51, 0, -0.5, 1, 0.5, 0, 40, 300, 0.05);
M30
```

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной

деятельности

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Колодяжный Дмитрий Юрьевич

« 1 »  2023 г.

## АКТ

об использовании в научно-исследовательских разработках

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»

результатов кандидатской диссертационной работы

Фокина Николая Николаевича

Настоящим актом подтверждаю, что ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН» в период 2021 по 2023 годы при выполнении работ в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» по темам 21-26/псал-4 и 22-18/псал-1 «Компьютерные системы управления технологическим оборудованием» внедрены следующие результаты диссертационной работы Н.Н. Фокина на тему «Модель, алгоритмы и программная реализация инструментария разработки управляющих программ для токарных, токарно-фрезерных и фрезерных станков с ЧПУ»:

1. Методика подготовки управляющих программ для токарных станков с ЧПУ «АксиОМА Контрол» с использованием разработанного инструментария;

2. Методика подготовки управляющих программ для фрезерных станков с ЧПУ «АксиОМА Контрол» с использованием разработанного инструментария;
3. Методика разработки циклов токарной обработки для системы ЧПУ «АксиОМА Контрол».

Использование результатов диссертационной работы Н.Н.Фокина облегчило возможность интеграции в разрабатываемые системы управления технологическими процессами наборов циклов механообработки для проведения типовых технологических операций.

Заведующий кафедрой  
компьютерных систем управления  
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
д.т.н., профессор



Мартинов Г.М.

Директор департамента  
стратегического развития  
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
к.э.н.



Еленев К.С.

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по образовательной  
деятельности и молодежной

политике

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Бильчук Мария Викторовна

« 2 » июня 2023 г.

## СПРАВКА

Об использовании в учебном процессе  
результатов кандидатской диссертационной работы

Фокина Николая Николаевича

Результаты диссертационного исследования Фокина Н.Н. на тему «Модель, алгоритмы и программная реализация инструментария разработки управляющих программ для токарных, токарно-фрезерных и фрезерных станков с ЧПУ» используются ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» при руководстве практиками студентов бакалавриата и магистратуры (производственная, учебная и преддипломная) и подготовке ВКР студентов кафедры компьютерных систем управления по направлениям бакалавриата 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» и магистратуры 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств».

В частности, полученные результаты применяются в следующих видах учебных занятий:

1. Научно-исследовательская работа магистров (9МАГ 15.04.04)
2. Педагогическая практика магистров (9МАГ 15.04.04)
3. Преддипломная практика (8А2)
4. Дипломное проектирование (бакалавры) (8А2)
5. Научно-исследовательская работа магистров (10МАГ 15.04.04)
6. Педагогическая практика магистров (9МАГ 15.04.04)

Заведующий кафедрой  
компьютерных систем управления  
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
д.т.н., профессор



Мartiнов Г.М.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ПАО «Долгопрудненское

Научно-Производственное Предприятие»

Олег Юрьевич Мартынов



## СПРАВКА

об использовании результатов кандидатской

диссертационной работы

Фокина Николая Николаевича

Результаты диссертационной работы на тему «Модель, алгоритмы и программная реализация инструментария разработки управляющих программ для токарных, токарно-фрезерных и фрезерных станков с ЧПУ» на соискание ученой степени кандидата технических наук, ведущего инженера-технолога-программиста Фокина Н.Н. были использованы в производственном процессе ПАО «Долгопрудненское Научно-Производственное Предприятие» при изготовлении типовых деталей на токарно-фрезерных станках с ЧПУ Siemens и Fanuc.

Использование указанных результатов в производстве позволило снизить на 35% время по подготовке и внедрению управляющих программ для изготовления типовых деталей по сравнению с использованием САМ-систем NX, Siemens ShopTurn и Fanuc ManualGuide.

Руководитель службы главного технолога —

Главный технолог

ГЛАВНЫЙ ТЕХНОЛОГ  
Начальник СГТ № 240  
Н.В. ФИЛАТОВ

Николай Владимирович Филатов

