

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ШВАРЦ АЛЕКСАНДР ИГОРЕВИЧ

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ И
ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКЕ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ
СРЕДСТВ АДАПТАЦИИ**

Специальность: **2.5.6 – Технология машиностроения**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Вартанов Михаил Владимирович

Москва 2026

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ФИНИШНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	9
1.1 Методы финишной обработки деталей в технологии машиностроения...	9
1.2 Технологическое обоснование роботизации механической обработки ..	18
1.3 Технические решения для обеспечения точности и качества механической обработки.....	22
1.4 Техничко-экономическое обоснование применения роботизированной механической обработки.....	36
1.5 Выводы по главе 1.....	40
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ..	41
2.1 Система управления оборудования при роботизированной механической обработке	41
2.2 Обоснование выбора подачи инструмента как параметра управления...	51
2.3 Экспериментальное исследование одноканальной жесткости оборудования	53
2.4 Блок-схема алгоритма управления оборудованием с коррекцией технологической подачи	58
2.5 Выводы по главе 2.....	63
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОСНАЩЕНИЕ И АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ	64
3.1 Описание экспериментальной установки	64
3.2 Калибровка датчика и фильтр сигнала.....	68
3.3 Последовательность проведения эксперимента.....	73
3.4 Экспериментальная апробация алгоритма управления.....	74

3.5 Выводы по главе 3.....	85
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ.....	86
4.1 Определение варьируемых факторов, выбор вида модели	86
4.2 Обработка результатов эксперимента.....	90
4.3 Определение коэффициентов регрессии.....	96
4.4 Проверка адекватности модели.....	98
4.5 Исследование влияния варьируемых параметров на величину шероховатости	100
4.6 Апробация алгоритма на промышленной детали	104
4.7 Выводы по главе 4.....	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	109
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	111
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Фрагмент кода RobotStudio роботизированной механической обработки	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Постпроцессор промышленного робота АBB.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Регистрация программы ЭВМ	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акты внедрения.....	135

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПР – промышленный робот;

ТР – технологические режимы;

ЧПУ – числовое программное управление;

ГТД – газотурбинный двигатель;

ПЭ – планирование эксперимента;

АУ – алгоритм управления;

СМД – силомоментный датчик;

ЭВМ – электронная вычислительная машина

ЦТИ – центральная точка инструмента;

ИВБ - информационно-вычислительный блок.

ВАО – виброобразивная обработка;

ПО – программное обеспечение;

РТК – робототехнический комплекс;

УП – управляющая программа;

ПАВ – поверхностно-активные вещества

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В настоящее время при изготовлении деталей сложной конфигурации остается высокой доля ручных слесарных операций. Автоматизация данных операций позволяет повысить надежность и производительность технологического процесса изготовления. Одним из вариантов решения является применение промышленных роботов, которые имеют ряд преимуществ в сравнении с классическими станками (более низкая стоимость, низкие эксплуатационные расходы, большие возможности переналадки). Автоматизация этих операций позволит сократить затраты, связанные с использованием труда высококвалифицированных рабочих. Применение средств активной и пассивной адаптации позволяет обеспечить качество при механической обработке и минимизировать брак в производстве.

Степень разработанности темы. Значительное развитие данной научной отрасли стало возможным благодаря трудам ученых: Афонин В.Л., Пономарев Б.Б., Сидорова А.В., Полетаев В.А., Волков Д.И., Вартанов М.В., Panuramines J., Doulas C., Stavropoulos P., Chrysidoids G., Pan Z., Zhang H., Olufsen B., Schneider U., Robertson A., Johansson R., Chen F., Zhao H., Li D., Chen L., Tan C., Ding H и др.

В настоящее время остаются востребованными исследования в области механической обработки в условиях неравномерного припуска, которые позволят обеспечить технологические требования и сократить объем ручных слесарных операций.

Целью работы является технологическое обеспечение качества криволинейных поверхностей при роботизированной обработке в условиях неравномерного припуска.

В диссертационном исследовании решались следующие задачи:

- 1) исследование технологических режимов как основы для разработки алгоритма порогового управления оборудованием;
- 2) разработка адаптивного алгоритма управления процессом механической обработки заготовок с неравномерным припуском;

3) разработка постпроцессора оборудования для реализации механической обработки;

4) создание методики и проведение физического эксперимента на заготовках с неравномерным припуском;

5) планирование эксперимента, установление взаимосвязей между параметрами оборудования, технологическими режимами и шероховатостью поверхности;

6) апробация разработанного алгоритма на промышленной детали.

Объект исследования: криволинейные поверхности заготовок деталей машин с неравномерным припуском.

Предмет исследования: технологические регламенты операций роботизированной механической обработки с использованием алгоритма управления.

Научная новизна исследования:

- алгоритм управления оборудованием на операции тонкого фрезерования с коррекцией технологической подачи в условиях неравномерного припуска;
- экспериментальные взаимосвязи режимов резания, параметров оборудования и качества поверхности детали (шероховатости и точности обработки).

Теоретическая значимость заключается в установлении взаимосвязей жесткости промышленного робота, технологических режимов и качества поверхности детали, реализуемых при использовании алгоритма порогового позиционного-силового управления.

Практическая значимость исследования:

- разработка экспериментального стенда на базе промышленного робота (ПР), оснащенного силомоментным датчиком, шпинделем и инструментом, позволяющего проводить исследование процесса резания;
- разработка рекомендаций по обоснованному выбору технологических режимов (ТР), обеспечивающих стабильность процесса и качество поверхности деталей;

– создание и апробация алгоритмического и программного обеспечения, реализующего принципы порогового позиционно-силового управления при выполнении операций механической обработки.

Методы и средства исследований. Теоретической базой диссертационного исследования послужили научные основы технологии машиностроения, классические положения теоретической механики и теории резания. При решении задач применялись методы линейной алгебры, аналитической геометрии и вычислительной математики. Компьютерное моделирование выполнялось с использованием RobotStudio, Autodesk Inventor, Autodesk PowerMill, СПРУТКАМ. Математическое моделирование и расчеты выполнялись с помощью MATLAB, Microsoft Excel.

Основные положения, выносимые на защиту:

- алгоритм управления манипулятором на основе обратной связи при тонком фрезеровании;
- экспериментальные взаимосвязи технологических режимов, кинематики промышленного робота и качества поверхности детали (точности и шероховатости).

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Достоверность научных выводов обеспечивается:

- корректным применением научных основ технологии машиностроения;
- использованием фундаментальных теоретических положений и современных инструментов компьютерного моделирования;
- использованием современного технологического оснащения при проведении эксперимента;
- адекватностью экспериментальных результатов и их согласованностью с известными исследованиями в рассматриваемой области.

Основные положения диссертации обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах: «Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов» (тема доклада: Роботизированное полирование плоских поверхностей с применением нейронных сетей) май 2023 г.;

«Машиностроительные Технологические Системы» (тема доклада: Обеспечение качества поверхности при роботизированной обработке в условиях неравномерного припуска) апрель 2025 г.; «Актуальные проблемы науки и техники» (тема доклада: Технологическое обеспечение роботизированной отделочной обработки криволинейных поверхностей) март 2025 г.; «Научноёмкие технологии в машиностроении: современные тренды, перспективы развития и опыт подготовки инженерных кадров 2025» сентябрь 2025 г. (тема доклада «Технологическое обеспечение качества при роботизированной отделочной обработке на основе средств адаптации» г. Алушта).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует паспорту научной специальности 2.5.6 «Технология машиностроения» в пунктах:

4) совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска;

7) технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин;

Основные публикации. По теме диссертации опубликовано 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК; получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; получены 2 акта о внедрении.

Структура диссертации. Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение и список литературы. Объем диссертации – 136 страниц машинописного текста, содержит 51 рисунок, 20 таблиц и 15 страниц приложений. Список цитируемой литературы включает 95 наименования.

ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ФИНИШНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

1.1 Методы финишной обработки деталей в технологии машиностроения

Финишная обработка деталей в машиностроении является завершающим этапом производства, направленным на достижение высокой точности размеров, формы и низкой шероховатости поверхности. В современном производстве конфигурация деталей постоянно усложняется, поэтому растет количество в слесарных и доводочных операций. К настоящему времени известен ряд методов финишной обработки [1-3].

Виброабразивная обработка. В настоящее время одним из высокопроизводительных методов финишной обработки деталей, габаритные параметры которых не превышают 300 мм, является виброабразивная обработка (ВАО) (рисунок 1.1)



Рисунок 1.1 – Установка для виброабразивной обработки

Данный технологический процесс реализуется в специализированных контейнерах (рабочих камерах), которые заполняются многокомпонентной рабочей средой, состоящей из абразивных гранул (рабочих тел), технологической жидкости и непосредственно обрабатываемых деталей.

Физическая сущность процесса заключается в возбуждении колебаний рабочей камеры, что приводит к сложному циркуляционному движению гранул и деталей. В результате относительного перемещения абразивных частиц и поверхностей деталей реализуется эффект микрорезания, обеспечивающий удаление заусенцев, сглаживание микронеровностей (снижение параметра шероховатости) и формирование радиусных кромок. Ключевым преимуществом ВАО является универсальность по отношению к геометрической сложности обрабатываемых изделий.

Технологические возможности метода охватывают широкий спектр операций:

- эффективное удаление заусенцев и притупление острых кромок на деталях;
- полное удаление остатков формовочных материалов с поверхностей отливок;
- упрочнение поверхностного слоя;
- подготовка перед нанесением покрытий для улучшения адгезии.

Конструктивное исполнение виброабразивных машин базируется на едином принципе преобразования энергии колебаний рабочей камеры в кинетическую энергию частиц абразива. Жидкость способствует активации процесса за счет химического или ПАВ-воздействия, а также уменьшает пылеобразование.

Принципиальное отличие виброабразивной обработки от традиционной галтовки заключается в возможности реализации прогнозируемого съема с меньшей интенсивностью. Это минимизирует взаимные соударения деталей, уменьшая вероятность повреждения.

Эмпирической базой для управления технологией служат зависимости радиусов скругления кромок от продолжительности обработки. Данные зависимости легли в основу разработки специализированного программного обеспечения, предназначенного для определения и оптимизации технологических параметров ВАО.

Отмечается ряд технологических ограничений:

- риск повреждения или деформации тонкостенных и легкодеформируемых элементов, а также сложность качественной обработки изделий с глубокими полостями или глухими отверстиями;
- процесс протекает в закрытой камере («безразмерный» характер зоны обработки);
- для деталей со сложной пространственной геометрией наблюдается неравномерность обработки различных поверхностей, обусловленная различной доступностью для абразивных частиц и различиями в скорости относительного перемещения среды в разных зонах контейнера.

Галтовка представляет собой технологический метод поверхностной обработки небольших деталей и заготовок, реализуемый в среде свободных рабочих тел и направленный на удаление заусенцев, окалины, облоя и иных поверхностных дефектов. Целью данного вида обработки является достижение высоких показателей качества поверхности, включая требуемые параметры шероховатости и устранение микронеровностей.

Классификация оборудования для галтовки основывается на принципе приведения в движение рабочей среды и обрабатываемых деталей. Основными типами машин являются: барабанные, вибрационные, роторные (центробежные), магнитные и буксирные установки. В качестве примера на рисунке 1.2 представлена конструкция галтовочного барабана, являющегося одним из наиболее распространенных типов оборудования.

Барабанная галтовка является наиболее простым и распространенным видом оборудования. Конструктивно галтовочный барабан представляет собой горизонтально расположенную или наклонную емкость, приводимую во вращение от электропривода. Принцип действия основан на вращении барабана, внутри которого находится смесь обрабатываемых деталей и рабочих тел (абразивных гранул, дроби, опилок и др.). При вращении материал поднимается трением о стенки до тех пор, пока сила гравитации не превысит силы сцепления, после чего верхние слои смеси скатываются вниз, обеспечивая взаимное трение и микроударное воздействие.



Рисунок 1.2 – Галтовочный барабан

Для предотвращения повреждения деталей жесткими соударениями в барабан часто добавляют смягчающий наполнитель, например, древесные опилки. Барабанные установки характеризуются простотой конструкции и невысокой стоимостью. Однако значительный уровень шума, неравномерность обработки деталей сложной конфигурации, невозможность обработки легкодеформируемых изделий, отсутствие визуального контроля в процессе и трудоемкость операций сепарации по окончании цикла затрудняют применение в производственном процессе. Длительность цикла в барабанных установках может составлять от 6 до 24 часов при скорости вращения 20–38 об/мин. Существуют также конструкции барабанов непрерывного действия, состоящие из нескольких последовательно соединенных камер, что позволяет организовать непрерывный процесс обработки. В зависимости от решаемой задачи может применяться сухая или мокрая обработка с использованием специальных компаундов и смазочно-охлаждающих жидкостей.

Обработка эластичным абразивным инструментом. Для финишной обработки крупногабаритных деталей, чьи габаритные размеры в плане достигают 1000 мм, может быть использован метод обработки вращающимися абразивными щетками. Данный тип инструмента может быть выполнен в двух основных

конструктивных исполнениях: из лепестков абразивной ленты, либо из полимерно-абразивных нитей (рисунок 1.3).

Указанный метод относится к классу обработки эластичным абразивным инструментом, что обуславливает его специфические кинематические и силовые характеристики.



Рисунок 1.3 – Обработка эластичным абразивным инструментом

Лепестковые круги, используемые для выполнения зачистных операций, как правило, имеют цилиндрическую форму. Такая конструкция обеспечивает достаточное пятно контакта для обработки плоскостей. К числу основных параметров процесса зачистки лепестковыми кругами на традиционном оборудовании относятся:

- частота вращения инструмента;
- величина осадки круга (глубина внедрения лепестков в материал детали);
- скорость продольной подачи (скорость перемещения инструмента относительно детали);
- количество рабочих ходов (число проходов для достижения требуемого съема материала).

Физическая сущность съема материала при работе лепестковым кругом

заключается в том, что необходимая для микрорезания сила резания формируется под действием двух основных факторов: центробежных сил инерции, возникающих при вращении отдельных лепестков и прижимающих их к обрабатываемой поверхности, а также упругих сил самого лепестка, стремящегося вернуться в исходное положение после деформации.

Очевидно, что применение такого инструмента для обработки деталей, имеющих поверхности переменной кривизны (например, корпусные детали сложной пространственной формы), сопряжено с существенными трудностями. Обеспечить равномерное удаление припуска на всей площади контакта в таких условиях крайне затруднительно в силу ряда причин:

1) при обработке криволинейной поверхности цилиндрическим инструментом площадь и форма зоны контакта непрерывно изменяются, что приводит к колебанию сил резания;

2) ввиду своей эластичности цилиндрический инструмент копирует погрешности формы, что снижает качество финишной обработки.

Ручная слесарная обработка. Финишные слесарные работы представляют собой завершающий этап механической обработки деталей, выполняемый с целью удаления технологических дефектов (заусенцев, грат), притупления острых кромок, формирования фасок и достижения требуемых параметров шероховатости поверхности. Данный вид обработки реализуется квалифицированными рабочими с применением ручного и механизированного инструмента, включая напильники различных профилей, проволочные щетки, абразивные пасты, шлифовальные круги, а также бормашинки с вращающимся абразивным инструментом (рисунок 1.4).

Несмотря на кажущуюся простоту, ручные слесарные операции характеризуются высокой трудоемкостью. Доля ручного труда в общем технологическом цикле изготовления фрезерованных деталей может достигать значительных величин. Для подобных деталей из алюминиевых сплавов, финишные операции занимают существенную часть времени изготовления, что обусловлено необходимостью индивидуальной доводки каждой детали.



Рисунок 1.4 – Ручная слесарная обработка.

На трудоемкость и качество финишных слесарных операций влияет ряд факторов, которые можно разделить на три группы:

Технологические факторы предшествующей обработки. Геометрические параметры образующихся заусенцев (высота, толщина, основание) напрямую зависят от режимов резания (подача, скорость, глубина резания), состояния режущего инструмента (степень износа, геометрия заточки), а также от физико-механических свойств обрабатываемого материала. Проведенный анализ показывает наличие существенной корреляции между материалом детали и размерами заусенца. В частности, экспериментально установлено, что при фрезеровании деталей из титановых сплавов размер образующегося заусенца в среднем в 5 раз превышает размер заусенца, характерного для деталей из алюминиевых сплавов при идентичных условиях обработки. Данное обстоятельство объясняется более высокой вязкостью титановых сплавов и их склонностью к пластическому деформированию в зоне резания.

Конструктивные факторы. Наибольшую сложность для финишной обработки представляют детали, имеющие сложную пространственную конфигурацию. К ним относятся изделия с развитым рельефом, содержащие множество конструктивных элементов, таких как:

- глубокие колодцы и карманы;
- внутренние полки и ребра жесткости;
- пазы и уступы сложной формы;
- труднодоступные внутренние полости;
- криволинейные поверхности.

Обработка подобных зон ручным инструментом затруднена из-за ограниченного доступа и необходимости использования специального профильного инструмента.

Субъективные факторы. Качество ручной слесарной обработки в значительной степени зависит от квалификации исполнителя, его опыта и психофизиологического состояния. Вариабельность внешнего усилия, угла наклона инструмента и траектории его перемещения приводит к нестабильности результатов. Наиболее критичными дефектами, возникающими вследствие человеческого фактора, являются:

- зарезы — локальные углубления, превышающие допустимый сьем материала, нарушающие геометрию детали;
- перешлифовки — чрезмерное удаление материала на отдельных участках, приводящее к выходу размеров за пределы поля допуска.

Возникновение указанных дефектов увеличивает долю брака и требует либо дополнительных затрат на исправление, либо приводит к неисправимому браку детали.

Высокая трудоемкость и зависимость качества от человеческого фактора стимулируют предприятия к поиску путей механизации и автоматизации финишных операций. Так, в условиях серийного производства ПАО «АК «РУБИН» в настоящее время проводится комплекс исследований, направленных на изучение возможности замены ручной слесарной обработки механизированными и автоматизированными методами. Целью данных работ является повышение производительности, стабилизация качества и снижение доли ручного труда.

С аналогичными проблемами сталкивается ПАО «ОДК-САТУРН» при производстве дисков ротора ГТД (рисунок 1.5)



Рисунок 1.5 – Слесарная обработка кромок диска ротора ГТД в условиях ПАО «ОДК-САТУРН»

В ходе операции протягивания замкового паза на выходе инструмента неизбежно образуется заусенец на торцевых поверхностях детали. Наличие заусенца затрудняет последующую сборку узла «диск-лопатки», поскольку соединение характеризуется минимальными конструктивными зазорами.

В связи с этим, в процессе ручной слесарной доводки решаются две взаимосвязанные технологические задачи:

- 1) полное устранение заусенца, оставшегося после операции протягивания, с торцевых поверхностей замкового паза;
- 2) создание на кромках паза фаски заданных геометрических параметров, которая облегчает процесс сборки и уменьшает вероятность заклинивания.

Допуск на величину формируемой фаски составляет 0,1–0,2 мм. Выполнение операции вручную требует от слесаря исключительной аккуратности, высокой квалификации и значительных временных затрат. Несмотря на кажущуюся простоту решаемых задач, обработка занимает продолжительное время, что обусловлено значительными габаритными размерами диска ротора и сложностью конфигурации обрабатываемых замковых пазов, расположенных на периферийной части детали.

1.2 Технологическое обоснование роботизации механической обработки

Роботизированная механическая обработка – перспективное направление в области машиностроения. В сравнении с классическими станками ЧПУ, промышленные роботы имеют значительно большую гибкость и возможность переналадки без применения дорогостоящей оснастки.

Применение промышленных роботов (ПР) в технологическом процессе производства деталей позволяет исключить человеческий труд в различных сложных, монотонных, вредных для здоровья человека операциях, что в свою очередь повышает стабильность, производительность, надежность технологического процесса.

Также следует отметить, что внедрение ПР в технологические процессы сталкивается с уникальным набором проблем, обусловленных особенностями конструкции и недостаточной жесткости ПР.

При построении роботизированных технологических комплексов для финишной обработки возможны две основнoвочные схемы:

- 1) компоновка «деталь в руке» (вариант с манипулированием заготовкой);
- 2) компоновка «инструмент в руке» (вариант с манипулированием обрабатывающим инструментом).

Компоновка «деталь в руке» характеризуется тем, что промышленный робот оснащается схватом, предназначенным для удержания и перемещения обрабатываемой детали. В данной схеме устройство финишной обработки (например, абразивный круг, щетка, полировальная лента или стационарный инструмент) жестко закрепляется на рабочей позиции, а робот обеспечивает пространственное манипулирование заготовкой относительно инструмента.

Данная конфигурация находит применение в тех случаях, когда обрабатываемая деталь характеризуется относительно небольшими габаритными размерами и массой. Ограничение по массе и габаритам обусловлено грузоподъемностью промышленного робота и инерционными нагрузками, возникающими при перемещении заготовки по заданной траектории.

Ключевым достоинством данной схемы является возможность интеграции транспортных и технологических функций в рамках одного рабочего цикла. Промышленный робот, оснащенный схватом, выполняет последовательность действий без переналадки и смены инструмента:

- захват заготовки из транспортной системы (конвейера, накопителя, кассеты);
- перемещение заготовки к позиции обработки и реализация требуемой траектории относительно стационарного инструмента;
- транспортировка детали на следующую позицию, либо в окончательную тару (упаковку), либо в промежуточные удерживающие приспособления (матрицы, спутники, накопители) для выполнения последующих технологических операций.

Отсутствие необходимости в отдельном загрузочном устройстве и совмещение во времени транспортировки и обработки позволяют существенно сократить длительность производственного цикла и повысить общую производительность роботизированного комплекса.

В качестве примера такой конфигурации можно выделить РТК по зачистке сварных швов кассет радиаторов на предприятии ООО «РОЯЛ ТЕРМО РУС» (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – РТК по зачистке сварных швов ООО «РОЯЛ ТЕРМО РУС»,
г. Киржач

Данный комплекс позволяет проводить абразивную обработку шва на кассете перед покраской. Заготовки получают методом штамповки, после сварки двух половин кассеты укладывают в магазин, в котором сохраняется необходимое позиционирование для промышленного робота. На выходном звене манипулятора установлена специальная оснастка, которая позволяет захватывать и удерживать кассеты за присоединительные отверстия. Конструкция приспособления позволяет обрабатывать кассеты высотой от 100 до 800 мм за счет быстрой настройки расстояния между зацепами.

Для зачистки шва используется абразивный метод обработки с бесконечной лентой, сама лента в рабочей зоне находится на упругом основании, за счет этого достигается значительная податливость ленты к обрабатываемой поверхности.

Компоновка «инструмент в руке». Конфигурация, при которой обрабатывающий инструмент закрепляется на выходном фланце манипулятора, а деталь фиксируется неподвижно. В настоящее время данная схема уступает по частоте применения конфигурации «деталь в руке», что связано с более поздним развитием систем управления процессом обработки и необходимостью решения задач силовой стабилизации. Тем не менее, современные достижения в области активного контроля сил создали предпосылки для существенного расширения номенклатуры технологических операций, реализуемых в данной компоновке.

Применение компоновки является технологически обоснованным в случаях, когда масса или габаритные размеры детали превышают грузоподъемность промышленного робота (например, крупногабаритные корпусные конструкции, элементы остекления, пресс-формы), единственно возможным способом роботизации является подвод инструмента к детали. При такой конфигурации также возможно применять пассивную или активную адаптацию.

В настоящее время Рыбинском государственном авиационном техническом университете ведутся научные исследования по отработке технологии финишной роботизированной обработке снятия заусенцев и притупления кромок корпусных деталей ГТД (рисунок 1.7).

Роботизированный комплекс позволяет удалять заусенцы и притуплять края

на различных по сложности корпусных деталях ГТД. На выходном звене промышленного робота установлен высокооборотистый шпиндель, а в качестве инструмента используется абразивный лепестковый диск. Гибкость и большая рабочая зона манипулятора позволяет обрабатывать широкую номенклатуру аналогичных деталей. Количество степеней свободы позволяет упростить оснастку, используемую для базирования и закрепления заготовки.

Обработка габаритных и сложных по конфигурации деталей вручную занимает большое количество времени, а монотонность и длительность операции часто приводит к браку и дополнительным доводочным операциям. Рабочая зона и гибкость 6-осевых манипуляторов позволяет поддерживать требуемую ориентацию рабочего инструмента к обрабатываемой криволинейной поверхности.



Рисунок 1.7 – РТК по удалению заусенцев деталей ГТД в РГАТУ имени П.А.

Соловьева, г. Рыбинск

Два основных ограничения прямого применения ПР для операций тонкого фрезерования: вибрации во время обработки и отклонения инструмента от программной траектории в условиях неравномерного припуска. В рамках диссертационной работы предлагается решение на основе алгоритма порогового управления с коррекцией подачи и выбора рациональных режимов резания, обеспечивающих точность и шероховатость поверхности.

1.3 Технические решения для обеспечения точности и качества механической обработки

Исследования роботизированных систем для механической обработки можно классифицировать в соответствии с силами, возникающими при резании. К настоящему времени роботизированные способы обработки, как правило, применяются в процессах с небольшими усилиями, такими как полировка и шлифовка. Поскольку основная цель полировки заключается не в изменении формы детали, а в обеспечении шероховатости поверхности, то не обязательно поддерживать высокоточный контроль положения.

Положение и ориентацию робота можно легко регулировать, за счет числа степеней свободы возможно держать инструмент перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Таким образом, полировка и шлифовка криволинейных поверхностей с использованием роботов могут обеспечить более высокое качество поверхности, чем трехкоординатные станки. Также находит применение способ роботизированной гидроабразивной резки. Хотя давление воды может приводить к отклонениям в положении робота, ошибка положения относительно мала по сравнению с контактными состояниями при резании.

В большинстве случаев роботизированные системы обработки используются только для процессов, которые не подразумевают больших усилий резания или требуют высокой точности траектории. В отличие от процессов сварки и окраски, требующих только повторяемости положения, фрезерование и сверление требует высокой точности траектории. В этой связи было проведено много исследований для анализа и компенсации ошибок при роботизированной обработке. Тенденции в исследованиях роботизированных систем обработки, направленные на обеспечение точности и качества обработки, представлены ниже.

Подавляющее большинство современных промышленных роботов (ПР), применяемых в различных отраслях машиностроения, построены по консольной (шарнирно-рычажной) кинематической схеме. Данная конструкция представляет собой разомкнутую кинематическую цепь, состоящую из последовательно

соединенных звеньев, каждое из которых оснащено собственным приводом (чаще всего электрическим) и системой управления. Такая архитектура обеспечивает высокую гибкость и маневренность, позволяя реализовывать сложные пространственные траектории и обслуживать значительные рабочие зоны. Каждое звено манипулятора, включая основание, плечо, предплечье и запястье, приводится в движение через передаточные механизмы, среди которых наиболее распространены планетарные, волновые и циклоидальные редукторы, а также ременные передачи. Наличие в каждом сочленении собственного привода с редуктором обуславливает накопление упругих деформаций и люфтов по мере удаления от основания робота к его выходному звену. Основным фактором, сдерживающим применение промышленных роботов в операциях механической обработки, является их невысокая жесткость и возникающие вибрации. Поэтому для применения в различных задачах механической обработки необходимо применение методов адаптации.

Совершенствование алгоритмов управления и моделирование динамики. Значительное количество работ посвящено разработке интеллектуальных систем управления, способных адаптироваться к условиям обработки. Так, в исследованиях Katić D. и соавторов [46, 47] предложен метод оптимизации параметров регулятора, базирующийся на динамической модели робота. Ключевая особенность подхода заключается в использовании предварительно обученного нейросетевого классификатора, который в реальном времени идентифицирует текущее состояние динамической среды и параметрические неопределенности модели робота, обеспечивая тем самым адаптивную настройку управляющих сигналов.

Дальнейшее развитие данного направления демонстрируют работы Zhang H. и др. [48], в которых впервые было реализовано объединение двух критически важных функций: оперативного моделирования (оценки) жесткости технологической системы и компенсации упругих деформаций, возникающих под действием сил резания, в режиме реального времени. Экспериментальная апробация разработанного подхода подтвердила возможность достижения высоких

показателей производительности съема материала при одновременном обеспечении требуемого качества обработанной поверхности.

Существенный вклад в понимание динамического поведения роботов внесли Mousavi S. и др. [61, 62], разработавшие детализированную многомассовую динамическую модель серийного манипулятора. Верификация модели осуществлялась путем идентификации ее параметров (геометрических характеристик балочных элементов, жесткостных и демпфирующих свойств) на основе экспериментальных данных. Важным практическим выводом из данной работы стала рекомендация по позиционированию центра инструмента (ЦИ) и ориентации режущего инструмента в зонах рабочего пространства с максимальной жесткостью.

Исследования Karim A. и др. [63] расширили представления о динамике роботов посредством проведения всестороннего экспериментального модального анализа в различных точках рабочего пространства. Полученные результаты убедительно демонстрируют, что изменение положения ЦИ приводит к существенной трансформации главных направлений колебаний, при этом применение линейной интерполяции для оценки распределения собственных частот является некорректным для отдельных областей рабочего пространства, что указывает на необходимость более сложных методов моделирования.

Конструкторско-компоновочные решения и анализ жесткости элементов робота. Повышение жесткости ПР возможно не только алгоритмическими, но и конструктивными методами. Авторы Dumas C. и др. [49] разработали универсальную методологию определения жесткостных характеристик звеньев для широкого класса шестизвенных промышленных роботов. Уникальность подхода заключается в учете как линейных, так и угловых упругих смещений выходного звена под воздействием обобщенной нагрузки (силы и момента резания), что позволяет строить более точные модели жесткости.

Более радикальный путь совершенствования предложен Denkena B. и др. [50], которые сконструировали специализированного двухосевого робота, изначально ориентированного на задачи механообработки. Архитектурное отличие

разработанной модели заключается в применении моментных двигателей, оснащенных высокоточными энкодерами. Такой подход позволил существенно минимизировать люфты и повысить жесткость приводов. В целом, однако, анализ литературы показывает, что исследования, направленные на улучшение жесткости ПР путем модернизации их компонентной базы, представлены недостаточно широко.

Оптимизация размещения заготовки и конфигурации робота.

Значительное число исследований сосредоточено на поиске оптимального взаимного расположения заготовки и манипулятора в рабочем пространстве, поскольку жесткость робота является функцией его конфигурации. Caro S. и др. [51-53] предложили методику оптимизации позиционирования заготовки, учитывающую прогнозируемые условия резания и карту жесткости робота. Данный подход показал наибольшую эффективность в системах с высокой кинематической избыточностью, где имеется больше степеней свободы для варьирования. Развивая эту идею, Garnier S. и др. [54] ввели комплексный критерий качества обработки, объединяющий требования к геометрической точности и производительности, что позволило решать задачу оптимизации размещения заготовки.

В работах Klimchik A. и др. [55, 56] представлен системный анализ набора технологических параметров роботизированной обработки с акцентом на использование индекса округлости как оценочного показателя. Предложенный подход позволяет одновременно учитывать такие факторы, как расположение заготовки и размеры используемой области рабочего пространства.

Исследования Subrin K. и др. [57] сфокусированы на кинематически избыточных роботизированных ячейках. Авторы ввели специальные критерии производительности, учитывающие ограничения, накладываемые процессом обработки, геометрической моделью детали и кинематикой манипулятора. Результатом работы стал алгоритм оптимального позиционирования поворотного стола, базирующийся на анализе жесткости манипулятора. Подчеркивается тесная взаимосвязь и взаимозависимость конфигурации робота и положения заготовки:

фиксация одного параметра накладывает существенные ограничения на выбор другого.

Альтернативный подход, основанный на учете смещений трех характерных точек выходного звена, предложен Xiong G. и др. [59]. Разработанный метод оптимизации положения на основе жесткостных характеристик может быть легко интегрирован в существующие CAD/CAM-системы для автоматической трансляции управляющих программ от станков с ЧПУ в программы для роботов.

Xie H. и др. [60] предложили метод одновременной компенсации ошибок параметров соединений и оптимизации конфигурации робота при фрезеровании, используя положение базовой системы координат робота и угол поворота инструмента в качестве избыточных переменных для расширения пространства поиска оптимального решения.

Работа Bu Y. и др. [42] фокусируется на оптимизации направления оси инструмента, разработана декартова модель податливости робота, интегрированная с количественным индексом оценки производительности обработки, что позволило экспериментально подтвердить повышение точности глубины сверления и осевого направления отверстий.

Специфика генерации траекторий и влияние технологических факторов. Принципиальное отличие роботизированной обработки от традиционной обработки на станках с ЧПУ заключается в механизмах формирования траектории. Atmosudiro и др. [77] предложили подход к планированию траектории в пространстве обобщенных координат, что потенциально позволяет оптимизировать нагрузку на приводы, однако экспериментальное подтверждение эффективности метода в работе не представлено.

Chen и др. [18] разработали нормализованный индекс жесткостных характеристик, являющийся производной от комплексного показателя, основанного на отношении внешнего силового воздействия к результирующему смещению выходного звена. Данный индекс служит для количественной оценки жесткости робота в конкретной конфигурации.

Моделирование и компенсация силы резания и вибраций являются ключевыми для обеспечения качества обработки. Bruning и др. [19] расширили функционал CAD/CAM-систем, включив в цепочку технологического планирования имитационную модель силы резания. Sen и Melkote [20] разработали усовершенствованную модель силы фрезерования, интегрирующую динамику робота и влияние внешней нагрузки на его жесткость, что позволило теоретически обосновать и экспериментально подтвердить снижение сил резания на 50–70%. Wang и Keogh [21] экспериментально доказали возможность снижения среднеквадратичной вибрации на 25% за счет активного управления, связанного с силой резания.

Huynh и др. [81] создали комплексную модель ПР для операций механической обработки, учитывающую податливость соединений и люфты в зубчатых передачах, однако апробация модели ограничилась фрезерованием алюминия и не распространялась на обработку стали. Garnier и др. [22] объединили модель процесса резания и упругую модель робота для анализа поведения при сверлении, а также затронули проблему износа инструмента. Tratar J. и др. [84] провели сравнительный анализ эффективности обработки на ПР и станке с ЧПУ, констатируя повышенный износ инструмента при использовании робота в конфигурациях с пониженной жесткостью.

Schreck и др. [85] предложили комплексное решение для обработки твердых материалов мелкими партиями, объединяющее планирование, программирование и адаптивное управление в реальном времени. Furtado и др. [23] экспериментально оптимизировали целый ряд параметров: конфигурацию робота, направления и стратегии фрезерования, глубину и режимы резания. Matsuoka и др. [24] продемонстрировали эффективность высокоскоростной обработки (до 100 000 об/мин) инструментом малого диаметра (3 мм), позволившей снизить силы резания на 50-70% за счет уменьшения сечения среза.

Mejri и др. [25] исследовали динамические характеристики роботизированной системы в условиях высокоскоростной обработки. Tratar и Корас [86] успешно применили робота для удаления сварных швов, подобрав

рациональные режимы резания. Klimchik и др. [55, 56] ввели компенсацию погрешностей, обусловленных податливостью, на основе нелинейной модели жесткости, используемую для оптимизации траектории с целью исключения вибраций. В последующих работах в модель компенсации были добавлены отклонения, вызванные упругими деформациями самого инструмента.

Можно выделить следующие стратегии повышения точности и качества поверхности при роботизированной обработке: оптимизация режимов резания; использование устройств активного контроля; использование внешних устройств для корректировки положения; пассивное демпфирование.

Оптимизация режимов резания. Orm Gienke и соавторы [87] разработали программный алгоритм для предотвращения вибраций при обработке плоскостей. Данное исследование направлено на поиск условий возникновения вибраций при постоянных параметрах кинематики робота. Во-первых, создается математическая модель структуры робота и объединяется с условиями возникновения вибрации. Проводится углубленный анализ критериев устойчивости с последующей экспериментальной проверкой модели. Предложены критерии устойчивости процесса на основе учета кинематики робота, направления сил резания в момент обработки (рисунок 1.8).

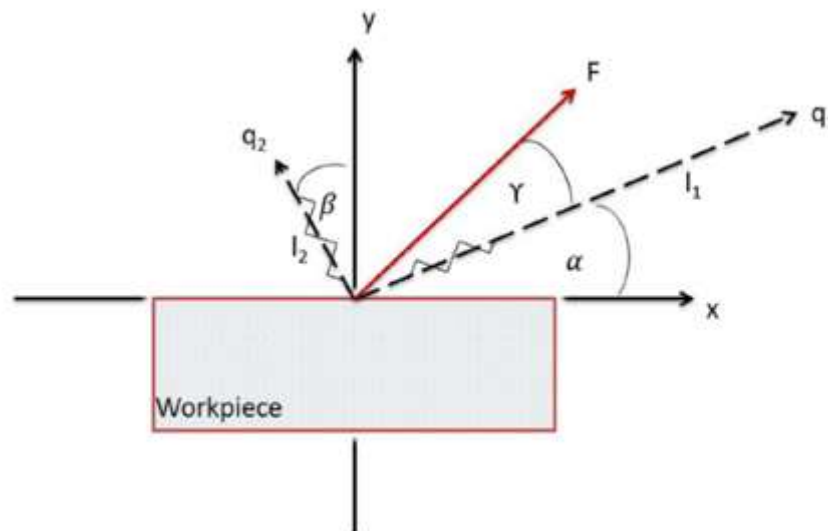


Рисунок 1.8 – Графическая интерпретация границ виброустойчивости: где q_1 и q_2 – собственные векторы матриц массы и жесткости промышленного робота; F – сила резания.

Авторами установлено, что при роботизированной обработке желательно иметь возможность изменять параметры обработки, конфигурацию, ориентацию инструмента, чтобы избежать вибрации. Значимые параметры имеют высокую сложность анализа вибрации при роботизированной обработке, однако их можно использовать для предотвращения вибрации. Перед началом роботизированной обработки необходимо задать ряд параметров:

- рабочее место;
- конфигурация робота;
- тип фрезерования;
- ориентация заготовки;
- геометрия фрезы.

Критерии устойчивости, изучаемые в статье, позволяют провести подробный анализ и выполнить роботизированную обработку без вибрации. Даже при наличии ограничений настройки, например, ориентации заготовки, можно стабилизировать процесс, изменив направление вращения шпинделя или направление подачи детали с попутного на встречное. Каждое положение обработки может быть нестабильным, но это не означает, что каждое положение можно стабилизировать. Установлено, что на вероятность возникновения вибраций влияют следующие факторы:

- 1) ориентация вектора рабочей подачи и угловое положение выходного звена манипулятора относительно обрабатываемой поверхности;
- 2) кинематическая конфигурация робота в зоне резания;
- 3) позиционирование заготовки в рабочем пространстве робота;
- 4) параметры режимов резания.

Авторами были выбраны четыре произвольные конфигурации робота и углы режущего инструмента к обрабатываемой поверхности. После проведения экспериментов (рисунок 1.9) были сделаны следующие выводы:

- существуют определенные конфигурации роботов, которые более склонны к вибрации;
- вибраций можно избежать, используя другой угол между поверхностью

резания и основанием робота. В большинстве случаев характер вибрации будет совершенно другим при повороте поверхности реза на $\pm 40^\circ$;

- если при встречном фрезеровании возникает вибрация, то при попутном, соответственно, ее может и не быть. Силы резания, перпендикулярные поверхности заготовки, являются лучшим выбором;

- каждое положение резания может привести к вибрации и каждое положение резания можно стабилизировать;

- выбор правильного инструмента с точки зрения силы резания. Режущий инструмент, создающий более высокие усилия в трех направлениях, с большей вероятностью вызовет больший диапазон вибраций.

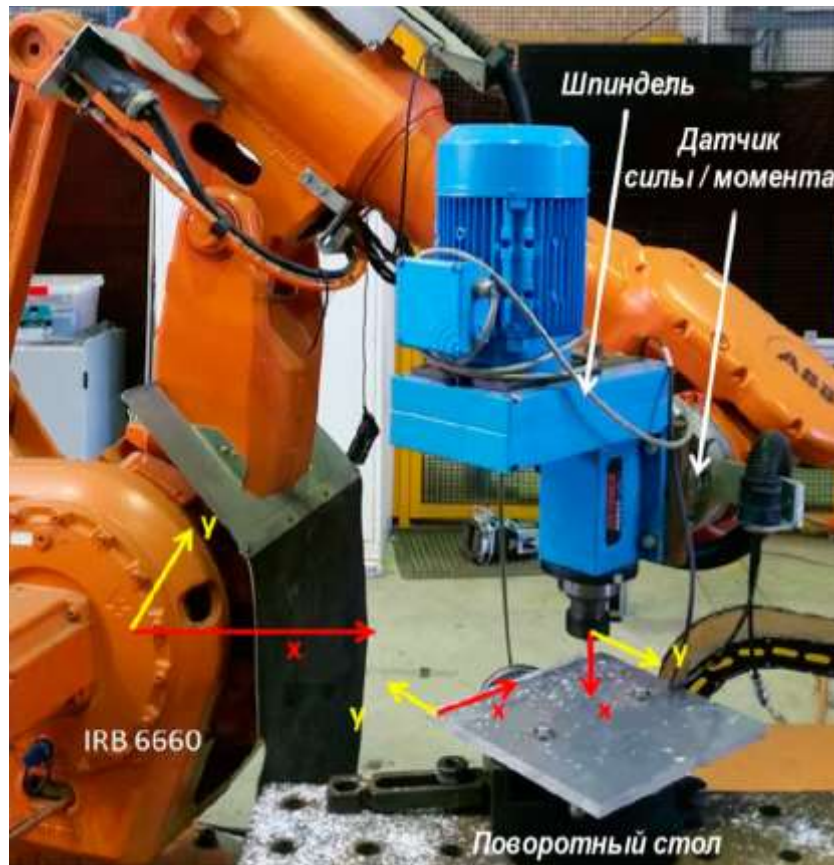


Рисунок 1.9 – Экспериментальная установка для проверки алгоритма подавления вибраций

Использование устройств активного контроля. С целью подавления вибрации Chen Fan и соавт. [88] разработали активное выходное звено манипулятора (рисунок 1.10), которое оснащено контроллером силы с компенсацией гравитации для поддержания контактного усилия между

полировальным инструментом и заготовкой. Разработано и интегрировано в интеллектуальное выходное звено два вихретоковых демпфера для улучшения динамики системы и подавления вибрации.

Заготовка моноколеса крепится к рабочему столу в приспособлении. Робот контролирует первичное положение торца инструмента для полировки заготовки. Адаптивное выходное звено дополнительно регулирует скорость перемещения полировального инструмента для активного контроля усилия взаимодействия. Вибрации подавляются демпферами, интегрированными в выходное звено.

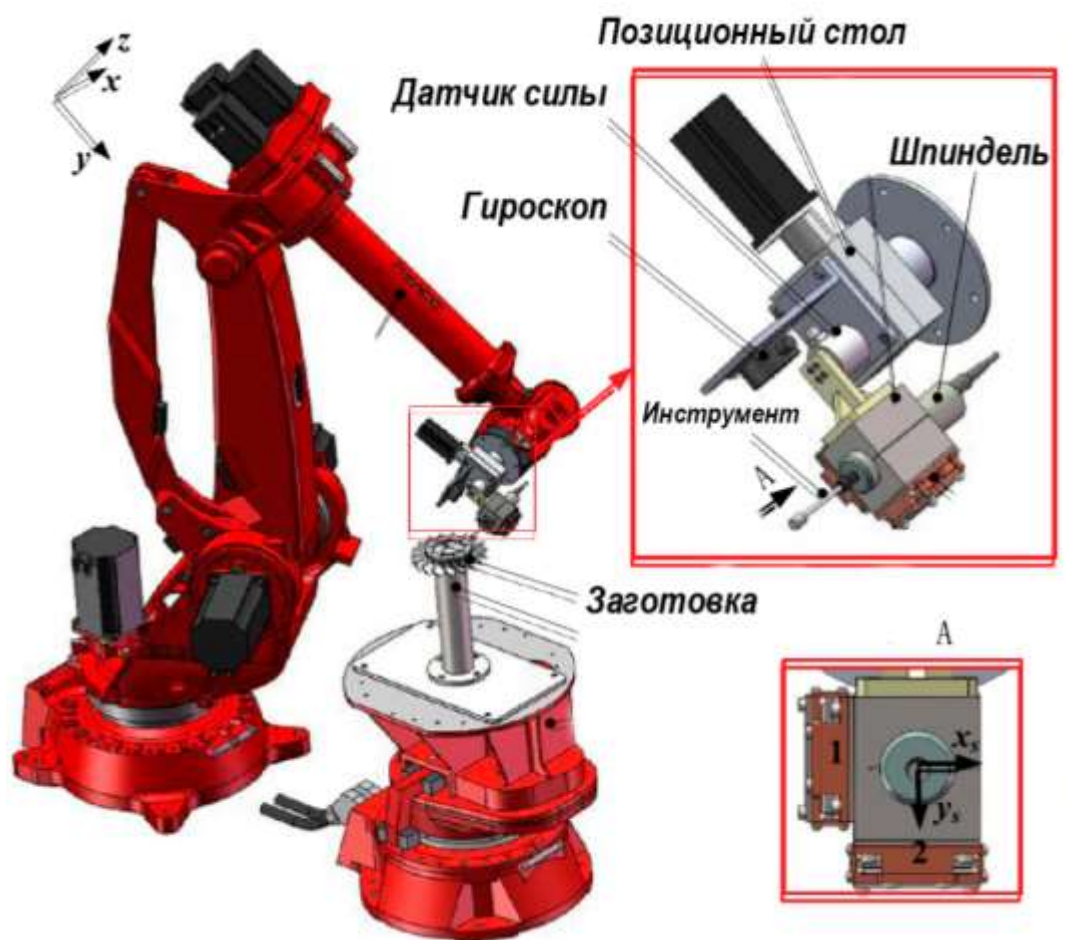


Рисунок 1.10 – Установка для финишной обработки лопаток ГТД с интеллектуальным выходным звеном

Выходное звено содержит полировальный инструмент, шпиндель, трехосевой датчик силы, трехосевой гироскоп позиционного стола с одной степенью свободы и двух специально разработанных демпферов, как показано на рисунке 1.10. Полировальный инструмент изготавливается путем приклеивания полоски абразивной бумаги на кончик стального стержня с помощью

двухсторонней вспененной ленты. Шпиндель крепится к датчику силы с помощью специального приспособления. Ось шпинделя и датчика силы расположены параллельно друг другу. Интеллектуальное выходное звено воспринимает контактное усилие между полировальным инструментом и заготовкой с помощью встроенного датчика силы. Кроме того, измеряются относительные углы между глобальной системой координат и осями датчика силы (x-y-z) с помощью датчика наклона для компенсации силы тяжести.

Скорость перемещения полировального инструмента по оси «у» регулируется позиционирующим столом в соответствии с командой контроллера. Два демпфера закреплены на шпинделе и расположены перпендикулярно друг другу, чтобы гасить вибрации шпинделя в обоих радиальных направлениях (x и y). После увеличения амортизации шпинделя вибрация шпинделя и вибрация инструмента ослабевают.

По результатам экспериментов установлено, что комплексное применение активной и пассивной адаптации позволяет значительно стабилизировать силы резания в зоне обработки (рисунок 1.11)

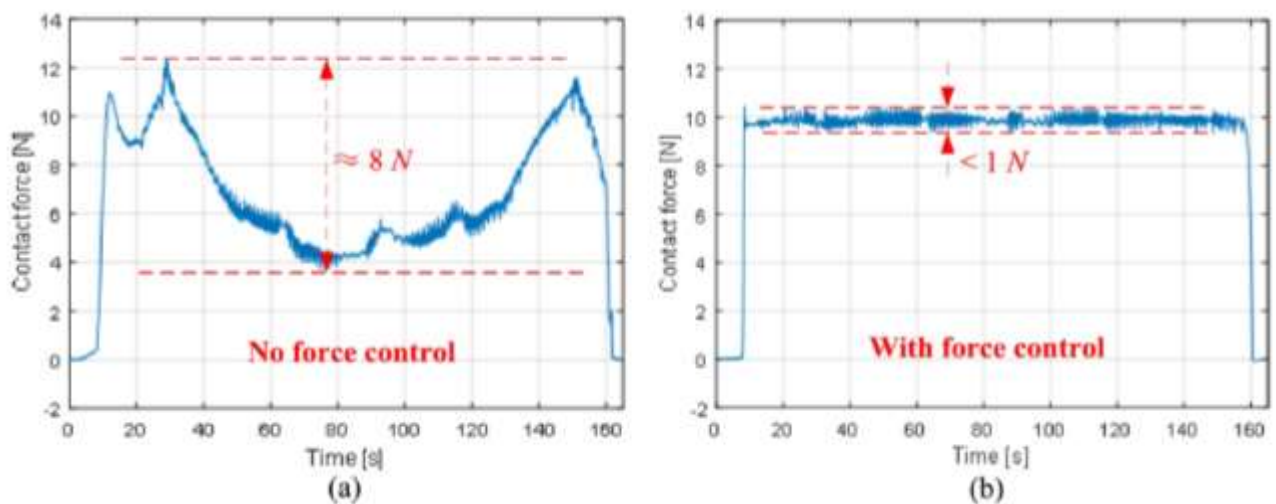


Рисунок 1.11 – Контактное усилие при обработке: а - без силового контроля; б - с активным силовым контролем

Использование внешних устройств для планирования траекторий и коррекции положения. В работе Schneider U. и соавторы [89] предлагают метод повышения точности позиционирования промышленного робота с помощью внешних устройств контроля. При работе с роботом устанавливается специальное

оснащение, которое отслеживает положение выходного звена и формирует команды для коррекции. В рамках исследования авторами предложена концепция модульного построения системы управления и программирования, функциональность которой реализуется на двух уровнях: этапе автономного программирования (офлайн) и в процессе непосредственного выполнения технологической операции (онлайн).

На этапе офлайн-подготовки управляющей программы предиктивная компенсация ожидаемых погрешностей обработки реализуется посредством разработанной системы программирования. В основе лежит комплексное применение кинематических и динамических моделей промышленного робота, что позволяет заблаговременно учесть влияние упругих деформаций звеньев и инерционных эффектов на точность позиционирования инструмента вдоль программной траектории. В ходе выполнения обработки в режиме реального времени задействуется механизм адаптивной компенсации. Данный механизм базируется на непрерывном мониторинге фактического положения исполнительного органа робота с использованием внешней измерительной системы (системы отслеживания). Информация о рассогласовании между требуемым и фактическим положением поступает в контур обратной связи, который формирует управляющие воздействия и вносит поправки в траекторию движения промышленного робота.

В качестве базового манипулятора в экспериментах используется промышленный робот KUKA KR125 (рисунок 1.12). Управление роботом осуществляется посредством программного контроллера с числовым программным управлением (ЧПУ) Beckhoff TwinCAT, что обеспечивает возможность высокоточной синхронизации движений и оптимизации траекторий применительно к задачам механической обработки.

Для исследования динамического поведения робота, идентификации источников погрешностей и верификации разработанного алгоритма применялся следующий комплекс измерительных средств.

1. Лазерный трекер Leica Absolute Tracker AT901 предназначен для

измерения пространственного положения рабочего органа робота в процессе функционирования. Трекер обеспечивает возможность трехмерных измерений с частотой дискретизации 1 кГц и предельной погрешностью измерения менее 20 мкм для выбранной рабочей области.

2. Одномерный лазерный триангуляционный датчик Keyence LK-G87 используется для регистрации влияния факторов окружающей среды на поведение робота, включая температурные деформации и низкочастотные колебания основания.

3. Для минимизации влияния внешних факторов робот и шпиндель смонтированы на массивной станине массой 14 тонн.



Рисунок 1.12 – Экспериментальная установка на базе робота KUKA KR125

В работе рассматривается полная механическая цепочка от окружающей среды до фланца и контроллера робота. Эксперименты по обработке и

эксперименты по движению в свободном пространстве показывают, что податливость и люфт являются наиболее доминирующими источниками погрешности. На основе анализа установлено, что податливость и люфт являются наиболее значимыми факторами. Калибровка кинематики робота и калибровка рабочей ячейки могут улучшить точность позиционирования, что может повысить точность обработки. Надлежащая развязка компонентов ячейки от окружающей среды и друг от друга может еще больше снизить возмущения процесса. Собственные колебания роботизированной системы могут быть устранены только внешними устройствами.

Из экспериментов по обработке установлено, что, помимо улучшений, которых можно достичь с помощью предлагаемых методов компенсации, общая настройка ячейки и выбранная стратегия обработки оказывают важное влияние на достижимую геометрическую точность и на качество получаемой поверхности. Обеспечение стабильных условий резания является основой для надежного применения подходов компенсации. Хотя общий предлагаемый подход не зависит от марки робота, реализация в демонстрационных ячейках показала различия в применимости в зависимости от соответствующей марки, а также различия между различными типами одной и той же марки.

Устройства пассивной адаптации используют для обеспечения податливости обрабатывающего инструмента к заготовке и часто применяются в полировке и шлифовке [26].

Важной частью установки является выходное звено (рисунок 1.13) [90]. Вместо обычного решения с пневматическим приводом, который не может точно поддерживать скорость вращения и может привести к чрезмерной полировке из-за чрезмерной скорости, для привода шпинделя используется электрический серводвигатель. Скорость вращения серводвигателя контролируется картой управления движением. Для проведения экспериментов установлен полировальный инструмент, который используется при ручной полировке. Он закреплен на двигателе через муфту. Полировальный инструмент состоит из эластичной резиновой опоры и абразивного диска. Резиновая опора

деформируется, что не только увеличивает площадь контакта между инструментом и деталью, но и улучшает податливость полировальной системы. За счет пассивной адаптации снижается возможность возникновения вибрации при обработке. В настоящее время чаще применяют комбинированный метод, при котором на выходное звено устанавливают СМД для контроля усилия прижима [90].

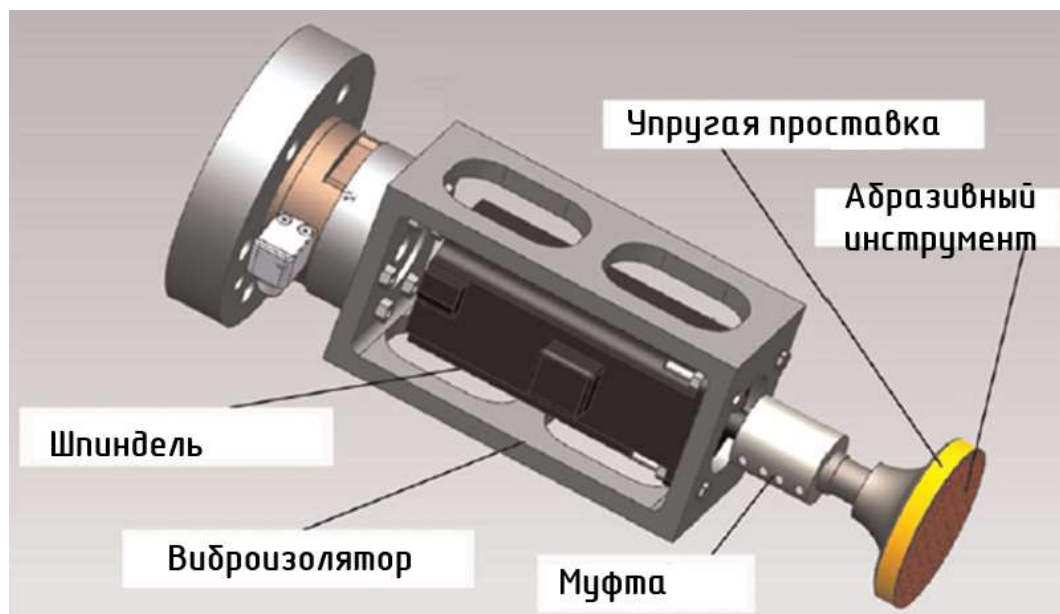


Рисунок 1.13 – Адаптивное выходное звено

Базовая траектория может изменяться каждый раз после завершения цикла полировки путем онлайн-самообучения, а для следующего цикла полировки генерируется новая базовая траектория.

Эффективность предлагаемой технологии [90] автоматической полировки оценивается путем реальных экспериментов по полировке деталей из титанового сплава TC11. Экспериментальные результаты показывают, что предлагаемая технология автоматической роботизированной полировки позволяет достичь требуемого качества поверхности.

1.4 Технико-экономическое обоснование применения роботизированной механической обработки

Внедрение нового оборудования в производственный процесс должно отвечать, как технологическим, так и экономическим требованиям. Однако закупка

оборудования требует серьезных капиталовложений, поэтому решения о модернизации должны быть экономически обоснованными. Главной целью технико-экономического обоснования (ТЭО) является определение финансовых показателей при внедрении новой техники, а также определение времени окупаемости инвестиций.

В качестве исходных данных принято:

- деталь – корпус плунжерного насоса (рисунок 1.14), группа финишных операций по удалению заусенцев, скруглений кромок и зачистке поверхностей;
- годовая программа: 3000 деталей;
- режим работы: 2 смены $\times$ 8 ч $\times$ 250 дней = 4000 ч/год (доступный фонд одной единицы оборудования);
- стоимость содержания 1 м² в год: 18 000 Р (1500 Р/мес $\times$ 12);
- срок амортизации (линейный): 5 лет для всех вариантов.

Операционные затраты (ОЗ) применяемого процесса равны:

$$ОЗ = А + ЗП + Э + \text{Инст} + \text{Обсл} + \text{Брак} \quad (1.1)$$

где А – расходы на аренду площади; ЗП – расходы на заработную плату; Э – расходы на электроэнергию; Инст – расходы на инструмент; Обсл – расходы на обслуживание; Брак – потери от брака.

Полные годовые затраты (ПГЗ) в таком случае имеют вид:

$$ПГЗ = ОЗ + А_{\text{м}} \quad (1.2)$$

где $A_{\text{м}}$ – расходы по принятому плану амортизации.

В расчете принято допущение о едином периоде амортизации для всех вариантов. Расходы на амортизацию зависят от стоимости инвестиций, то есть первоначальных капиталовложений.

В таком случае стоимость станко-часа для сравнения в равных условиях можно определить:

$$\text{Стоимость} = ПГЗ / \text{станкостоемость} \quad (1.3)$$

Также для сравнения используется показатель периода окупаемости, который можно определить:

$$\text{Окупаемость} = \text{инвестиции} / (ОЗ_{\text{универсал}} - ОЗ_{\text{чпу}}) \quad (1.4)$$

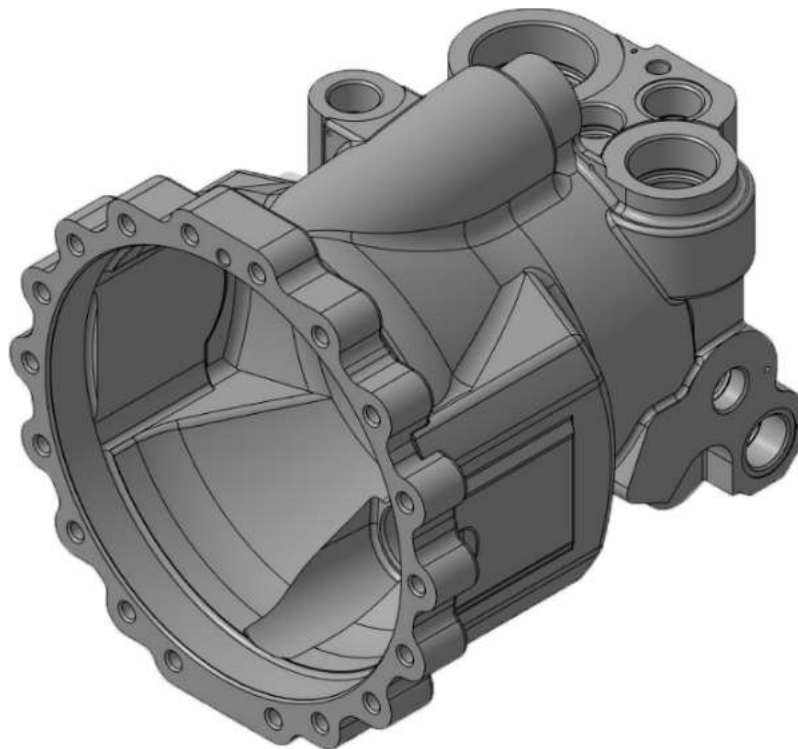


Рисунок 1.14 – Корпус плунжерного авиационного насоса

Используя представленные выражения и данные по станкоемкости целевых операций сформирована сводная таблица для различных вариантов реализации (таблица 1.1)

Таблица 1.1 Технико-экономическое обоснование для различных вариантов оборудования

Параметр	Универсальные станки	5-осевой станок с ЧПУ	Промышленный робот
Инвестиции (оборудование + оснастка), Р	4 600 000	22 000 000	12 000 000
Штучное время, ч	1,25	0,5	1
Станкоемкость, ч	3750	1500	3000
Персонал (расчетный эквивалент)	4	1	1
Занимаемая площадь, м²	70	40	32

Годовая зарплата (с налогами), Р	$4 \times 128\,700 \times 12 = 6\,177\,600$	$1 \times 185\,900 \times 12 = 2\,230\,800$	$1 \times 214\,500 \times 12 = 2\,574\,000$
Электроэнергия (год), Р	150 000	125 000	87500
Инструмент (год), Р	75 000	125 000	100 000
Обслуживание (год), Р	150 000	600 000	400 000
Потери от брака (год), Р	250 000	32 500	100 000
Полные годовые затраты = операционные затраты + Амортизация, Р	$8062\,600 + 920\,000 = 8\,982\,600$	$3\,833\,300 + 4\,400\,000 = 8\,233\,300$	$3\,837\,500 + 2\,400\,000 = 6\,237\,500$
Стоимость станкочаса, Р/ч	$8\,982\,600 / 3750 = \underline{\underline{2395}}$	$8\,233\,300 / 1500 = \underline{\underline{5489}}$	$6\,237\,500 / 3000 = \underline{\underline{2079}}$
Период окупаемости = инвестиции / экономию ОЗ, лет	-	<u>5,2</u>	<u>2,8</u>

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. стоимость станко-часа промышленного робота является самой низкой среди сравниваемых вариантов;
2. период окупаемости при использовании промышленных роботов составляет меньше 3 лет, что является важным показателем для обеспечения обновления технологий и оборудования.

Сделанные выводы позволяют утверждать о целесообразности применения промышленных роботов в технологическом процессе изготовления корпуса плунжерного насоса. Также стоит отметить, что в случае расчета для широкой номенклатуры производимых деталей промышленный робот будет выигрывать еще больше у варианта с фрезерным станком ЧПУ за счет большего размера рабочей зоны, меньшего времени переналадок, лучшей доступности.

1.5 Выводы по главе 1

1. Роботизация механической обработки является новым и перспективным направлением в области машиностроения. В сравнении с классическими станками ЧПУ, промышленные роботы имеют значительно большую гибкость и возможность переналадки без применения дорогостоящей оснастки.

2. Основными проблемами при роботизированной обработке являются недостаточная жесткость и точность промышленных роботов. Применение средств адаптации позволяет расширить технологические возможности оборудования в области механической обработки

3. В настоящее время наблюдается тенденция усложнения конфигурации деталей. Слесарная обработка подобных деталей, особенно в условиях неравномерного припуска, является крайне затруднительной, однако может быть реализована в условиях применения промышленных роботов.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В главе 1 поставлена задача разработки методики проектирования операции роботизированной обработки в условиях неравномерного припуска и переменной жесткости манипулятора на основе силомоментного управления. В данной главе решается задача определения предельных (граничных) силовых факторов в зоне резания с целью обеспечения технологической надежности процесса механической обработки.

Силы и моменты в процессе обработки криволинейных поверхностей имеют различные направления и значения. Любое усилие, возникающее в процессе обработки, смещает центральную точку инструмента (ЦТИ) от программной траектории на некоторую величину.

Так как ПР имеет значительно меньшую жесткость в сравнении с классическими станками с ЧПУ [18, 42, 59], то для обеспечения точности необходим механизм адаптации, который позволит компенсировать недостаточную жесткость ПР. В данной работе предлагается методика построения механической роботизированной обработки на основе учета одноканальной жесткости ПР и неравномерного припуска.

2.1 Система управления оборудования при роботизированной механической обработке

Для построения траекторий движения на основе 3D-модели детали используются САМ-программы. В работе использовалась программа СПРУТКАМ. Основные этапы для формирования управляющей программы:

- подготовка и импортирование САД-модели детали (на данном этапе задается материал, припуск и взаимное расположение в системе координат оборудования, рисунок 2.1);
- выбор поверхностей обработки и назначение технологических режимов,

расчет траектории движения;

- генерация управляющей программы с помощью постпроцессора (рассчитанные траектории преобразуются в управляющую программу контроллера оборудования).

Постпроцессор оборудования с ЧПУ — это необходимый программный компонент, который выступает в роли связующего между САМ-программой и станком/манипулятором. Его основная задача – преобразование универсальных данных о траектории движения инструмента в программу обработки, которую сможет выполнить конкретный станок, либо манипулятор. Таким образом, без постпроцессора невозможно создание управляющих программ (УП) механической обработки криволинейных поверхностей.

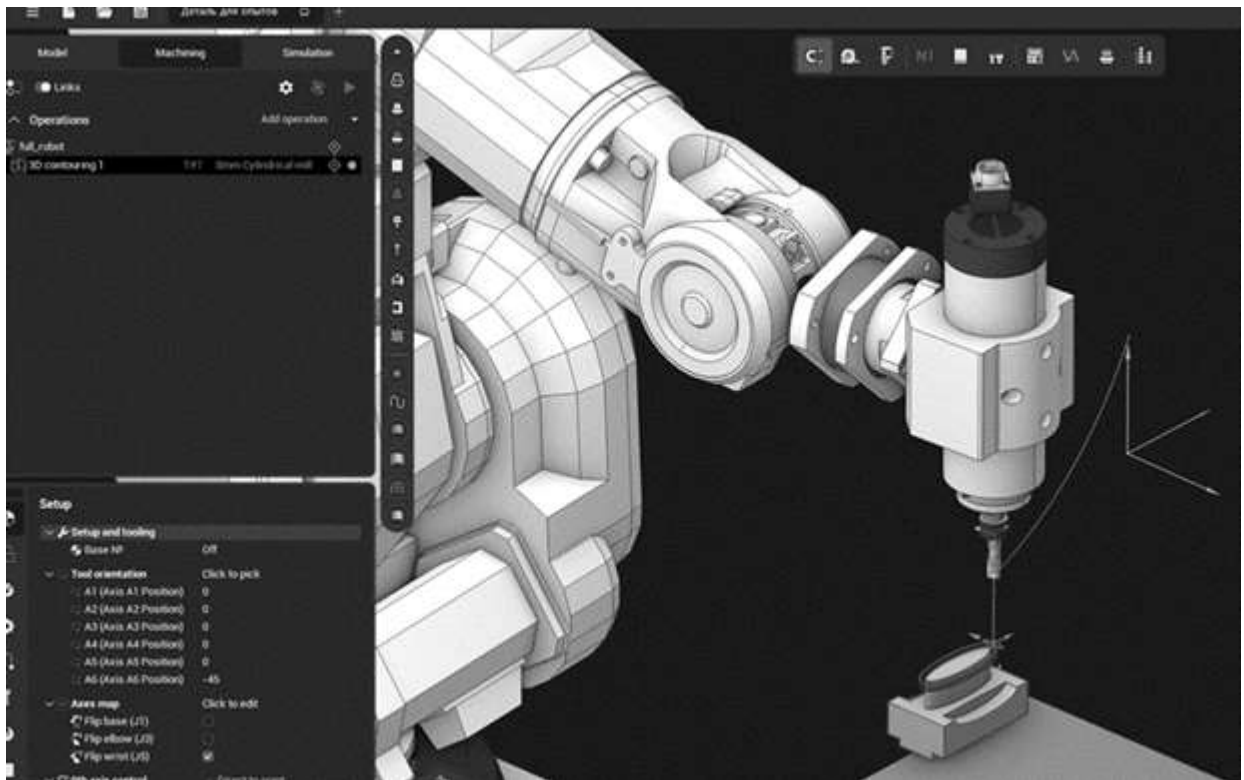


Рисунок 2.1 – Моделирование процесса обработки в среде СПРУТКАМ

Основные функции постпроцессора:

- учет кинематической схемы, диапазонов перемещения по осям, типов и форматов управляющих команд;
- генерация кодов под синтаксис конкретной стойки;
- учёт взаимного расположения осей вращения;
- удаление «лишних» перемещений;

- оценка сингулярных конфигураций промышленных роботов;
- автоматическое добавление стандартных блоков, номеров инструмента, вызова дополнительного оборудования;
- учет взаимного расположение осей вращения и контроль ориентации инструмента во время обработки для многоосевых станков.

В ПО СПРУТКАМ имеется встроенный генератор постпроцессоров, предназначенный для создания и настройки под конкретное оборудование. Это встроенная среда со своим языком, форматом и отладчиком. Применительно к промышленному манипулятору, можно создать цифровую копию описывающую взаимное расположение оборудования и заготовки. Среда разработки поддерживает: математические выражения и функции, операторы ввода/вывода, вызов подпрограмм, формирование кадров УП.

Таким образом, подготовленный постпроцессор позволяет автоматизировать создание УП и набора команд для функционирования манипулятора. Продолжение УП постпроцессора приведено в Приложении Б.

Стойка управления манипулятора выполнена на базе контроллера ABB IRC 5, поддерживает офлайн и онлайн программирование. Стойка оснащается пультом управления FlexPendant (рисунок 2.2), который необходим для написания и отладки программ управления.

Основные функции в главном меню пульта управления:

- настройка программируемых позиций;
- мониторинг и управление отдельными сигналами ввода-вывода и их группами с возможностью изменения и имитации значений;
- окно настроек перемещения робота рукояткой управления и отображения информации о текущем положении и состоянии робота;
- технологическое окно для просмотра кода программы в процессе ее выполнения;
- редактор программ для создания и изменения кода программы;
- окно программных данных, содержащее функции просмотра данных и их редактирования;

- резервное копирование и восстановление данных системы и файлов программ;
- калибровка механических узлов системы;
- просмотр и изменение настроек системы;
- данные о контроллере, загруженной системе, версии и доступных опциях RobWare и т.п.



Рисунок 2.2 – Пульт FlexPendant для промышленного робота ABB

Также на пульт выведена информация о текущем состоянии оборудования, в раскрывающемся списке перечислены основные исторические данные об ошибках, аварийных остановках и информационных уведомлениях.

Существует два способа программирования промышленных роботов: онлайн и офлайн программирование.

Способ онлайн программирования реализуется непосредственно с задействованием реального манипулятора. Данный способ сводится к созданию алгоритма управления промышленным роботом путем ручного обучения всех точек траектории движения выходного звена. Главным недостатком такого способа является то, что при программировании робот находится в состоянии переналадки,

т.е. в состоянии простоя, что негативно сказывается на общей производительности автоматических систем в целом, особенно, когда система состоит из нескольких манипуляторов.

Для решения данной проблемы был разработан способ офлайн программирования. Суть этого способа заключается в том, что создание алгоритма движения промышленным роботом возможно в среде виртуального программирования в автономном режиме без прерывания технологического цикла. Таким образом, переналадка манипулятора сводится лишь к загрузке готовой программы в систему управления промышленным роботом, что существенно сокращает время переналадки и благоприятно сказывается на производительности.

Рассмотрим возможности программного обеспечения на примере RobotStudio от компании ABB (рисунок 2.3).

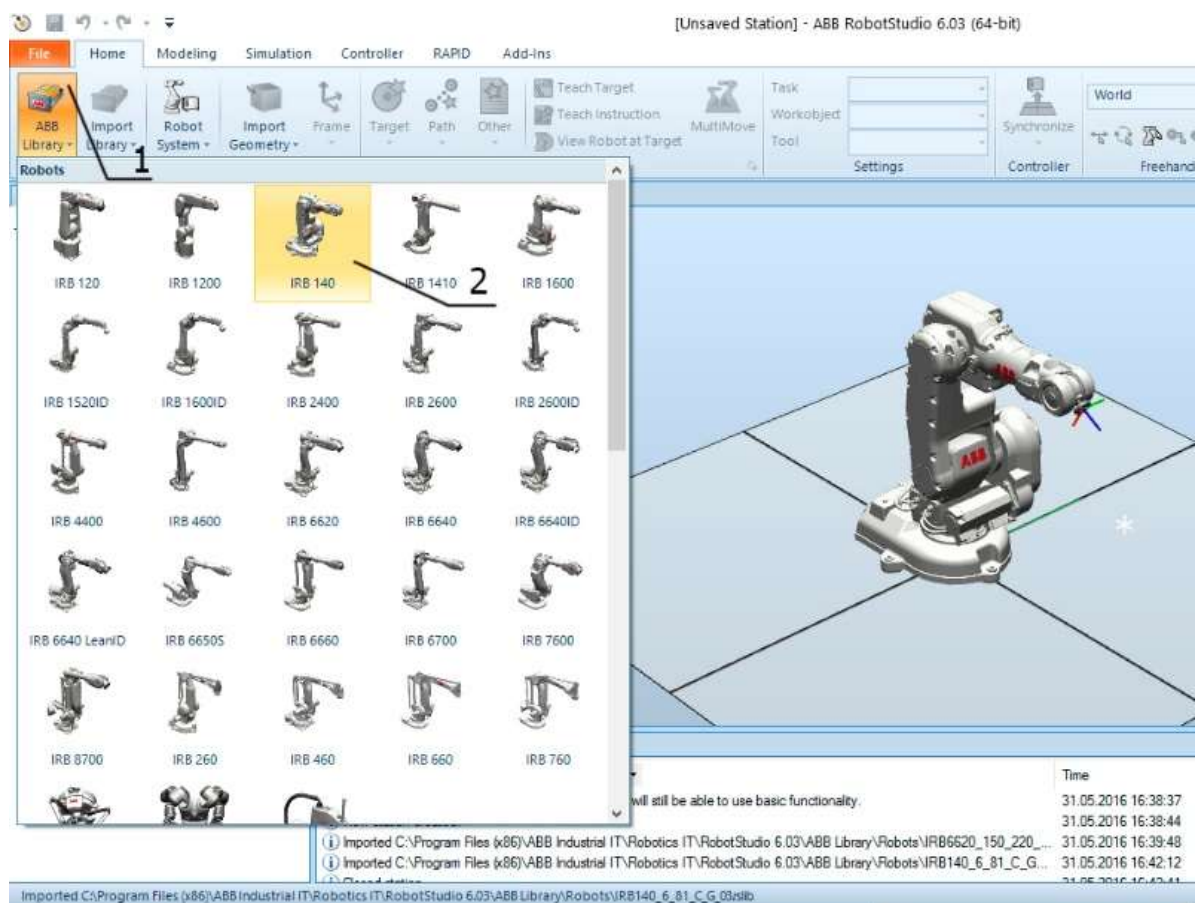


Рисунок 2.3 – Рабочая среда виртуального управления.

Программа является точной копией реального программного обеспечения, которое используют роботы на производстве. Это позволяет проводить реалистичную симуляцию, используя алгоритмы управления роботами и файлы

конфигураций идентичные тем, которые используются в производстве.

На начальном экране можно добавить необходимый ПР из библиотеки компании АВВ (Рисунок 2.3). Для моделирования движения манипулятора необходимо инициировать загрузку виртуального контроллера.

Для реалистичного моделирования процесса обработки в симуляцию необходимо добавить все элементы робототехнического комплекса (рисунок 2.4)

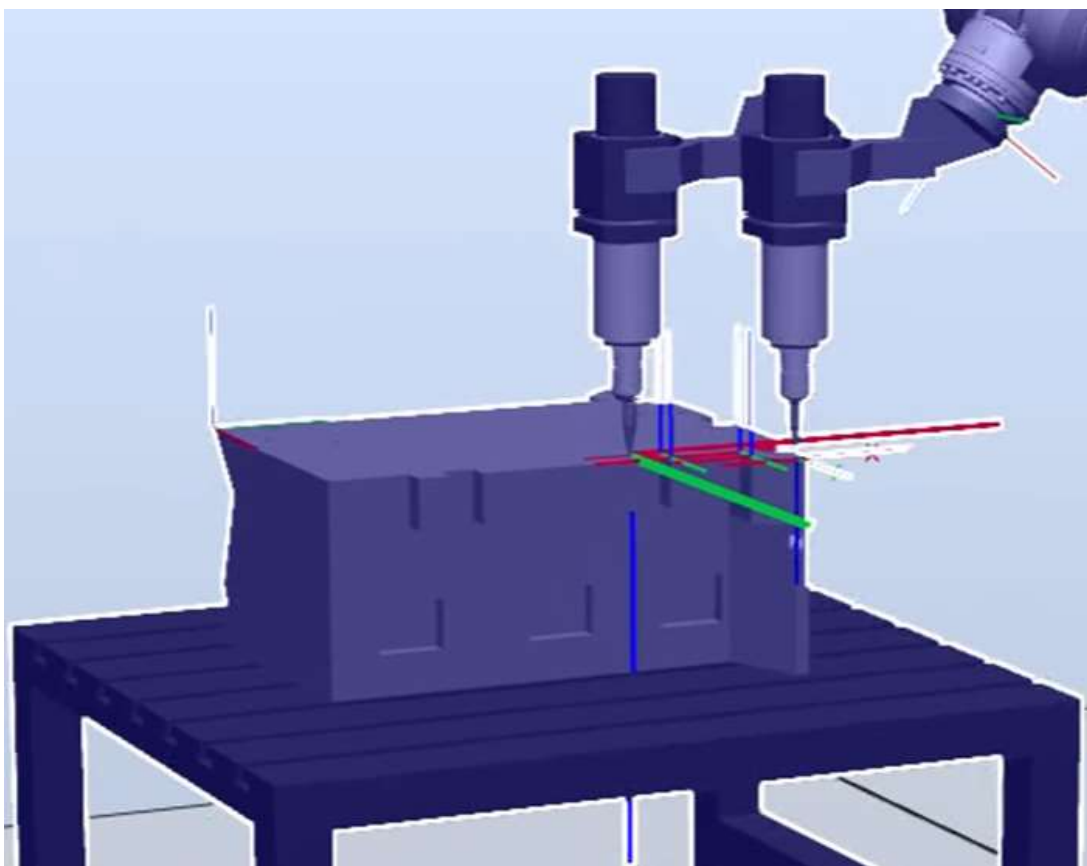


Рисунок 2.4 – Робототехнический комплекс в среде RobotStudio

Далее на основе циклограммы операции задаются команды перемещения ПР. Существует 2 основных команды задания движения манипулятора к точке – **MoveJ** и **MoveL** (рисунок 2.5).

Интерполяция соединений (Joint Interpolation) или команда **MoveJ**. используется в ситуациях, когда точность траектории движения не важна. Данный тип движения используется, чтобы быстро переместить инструмент из одной точки в другую. Данное перемещение также позволяет переместить ось робота из любой точки в пределах рабочей зоны за одно движение. Все звенья движутся от начальной точки к конечной с постоянной скоростью.

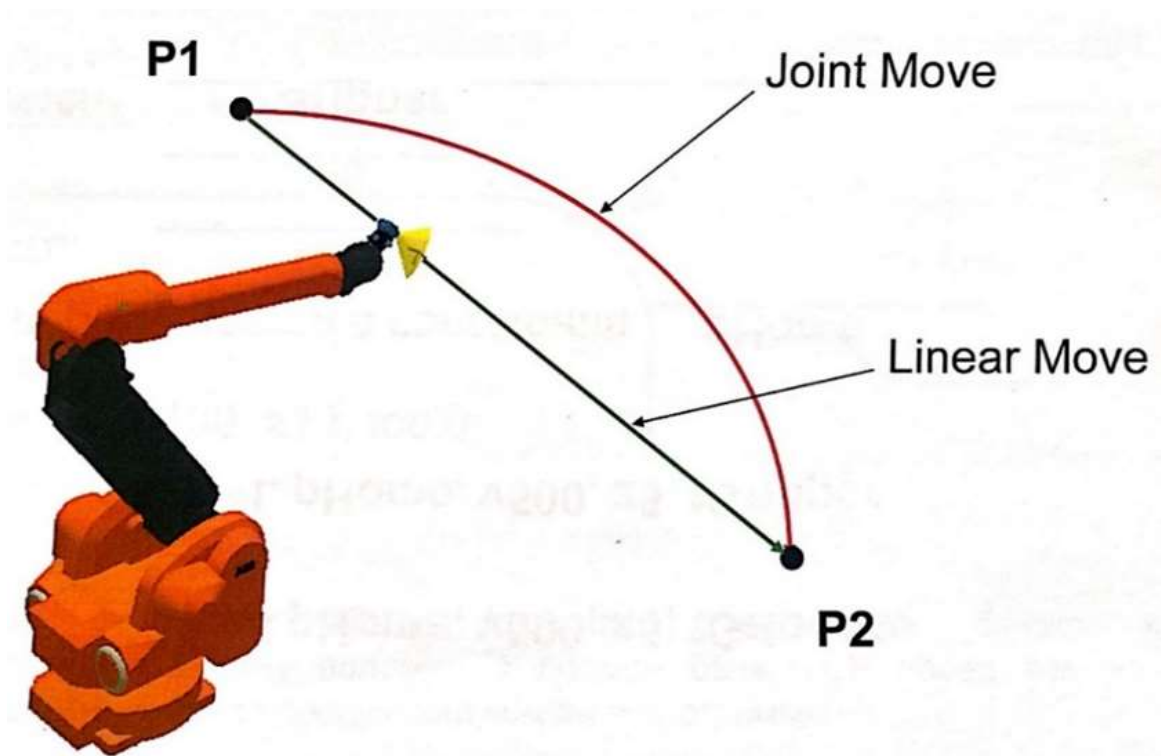


Рисунок 2.5 – Команды MoveJoint и MoveLinear

Линейная интерполяция (Linear Interpolation) или команда MoveL. В процессе линейной интерполяции инструмент движется вдоль прямой линии.

В процессе интерполяции для осуществления движения, определяется скорость лимитирующего звена, которое движется наиболее быстро по сравнению с максимальной скоростью. Затем рассчитываются скорости остальных звеньев, таким образом, чтобы они достигли конечной точки одновременно. Все оси скоординированы таким образом, чтобы получить траекторию независимую от скорости. Ускорение автоматически оптимизируется для достижения максимальной производительности.

В случае выполнения обработки криволинейной поверхности за генерацию траекторий отвечает САМ-программа и постпроцессор, однако для привязки обрабатывающего инструмента необходимо выполнить калибровку, которая позволит сохранить данные о ЦТИ в стойке манипулятора. На заводе-изготовителе производится только базовая калибровка и данные сохраняются в раздел «tool0», что соответствует центру фланца шестой оси. Поэтому для реализации калибровки с учетом установленного инструмента, требуется проводить процедуру повторно.

Система управления поддерживает два вида калибровки:

1. по четырем точкам;
2. по четырем точкам с направлениями Z и X.

Второй вид калибровки применяется, когда важно обеспечить направление осей инструмента. Настройка производится относительно стационарного калибра с острым концом (рисунок 2.6).

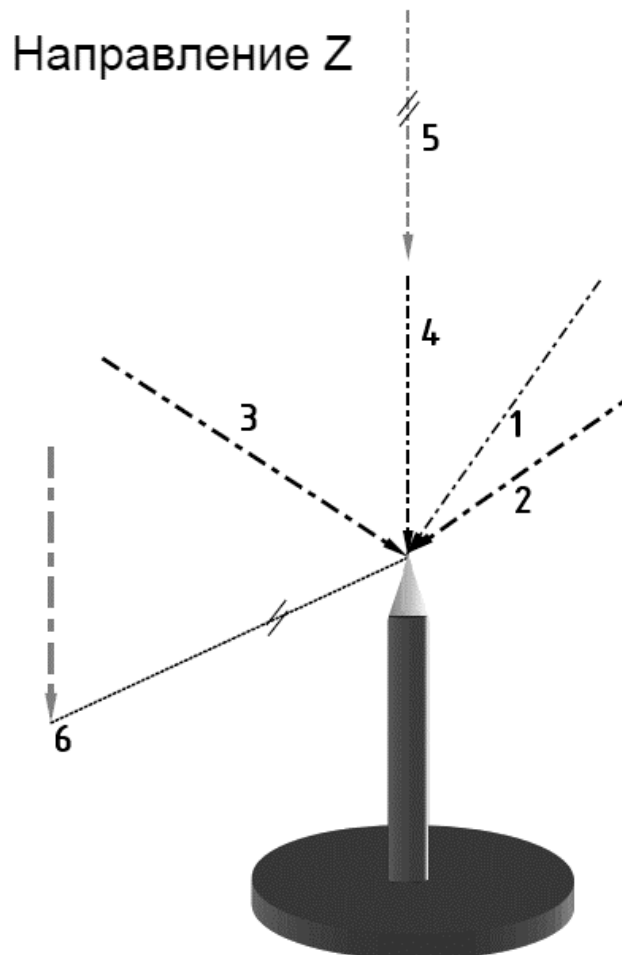


Рисунок 2.6 – Схема калибровки инструмента

Процедура калибровки состоит из следующих шагов:

1. Подвод инструмента к калибру с различных направлений (соответствует точкам 1-4).
2. Возврат в вертикальное положение и перемещение по осям X и Z.

Данные по калибровке сохраняются в энергонезависимую память контроллера. Система управления позволяет калибровать и сохранять данные о различных применяемых инструментах. Для корректной работы необходимо в каждой УП производить процедуру выбора соответствующего инструмента.

В контроллере ABB IRC-5 аппроксимация криволинейных поверхностей реализована через механизм зон (zone data). Это встроенный способ сглаживания траекторий при программировании на RAPID. В командах движения манипулятора есть обязательный параметр «zone», который определяет будет ли робот останавливаться в заданной точке или нет.

В RAPID-инструкции это задается следующим образом:

- MoveL p1, v100, fine, tool0; 'Точно в p1 с остановкой.
- MoveL p2, v100, z5, tool0; 'Аппроксимация с зоной 5 мм.

Значение зоны можно наглядно представить в виде окружности с заданным радиусом, при нахождении в которой инструмент начинает перемещаться к следующей точке (рисунок 2.7).

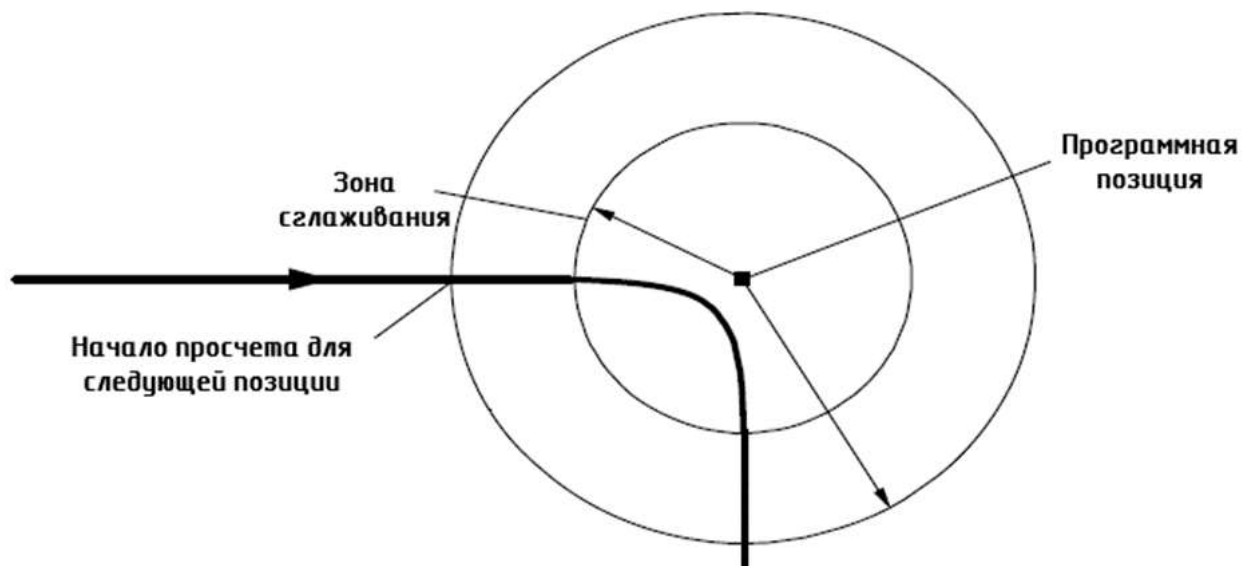


Рисунок 2.7 – Геометрическое описание параметра «zone data» в среде RobotStudio

Также в каждой команде можно задать скорость перемещения через параметр v (velocity). По сути при выполнении операции тонкого фрезерования данным параметром является технологическая подача инструмента. При этом работоспособность и плавность движения инструмента обеспечиваются за счет расчета параметров движения инструмента на несколько шагов вперед.

Таким образом, введя переменную для определения скорости, контроллер промышленного робота получает возможность изменять скорость движения в

зависимости от силовых факторов в зоне резания. Плавность и отсутствие рывков при изменении подачи реализуется на уровне сервоприводов манипулятора.

В процессе обработки происходит постоянная передача данных с силомоментного датчика и в случае превышения любой из составляющих допустимой величины силы резания формируется сигнал на изменение величины подачи инструмента. Ниже представлен фрагмент управляющей программы. (рисунок 2.8)

Программа состоит из двух модулей: модуля движения и модуля опроса силомоментного датчика для оценки состояния силовых факторов в зоне резания. Для каждого модуля выделено место в памяти контроллера и поток информации. Поскольку язык RAPID подразумевает построчное выполнение команд, многозадачность решает проблему выполнения логических операций во время движения манипулятора. Управляющая программа приведена в Приложении А.

```

MODULE ABB2 ! модуль движения
VAR num FXlim; VAR num FYlim; VAR num FZlim;

pers num work_speed;

MODULE check force ! модуль для опроса датчика
pers num work_speed;
pCurrentPos := CRobT(); ! Запрос текущей позиции
x := pCurrentPos.trans.x; ! Извлечение координаты X
y := pCurrentPos.trans.y; ! Извлечение координаты Y
z := pCurrentPos.trans.z; ! Извлечение координаты Z
IF FX_1 > FXlim OR FX_1 > FYlim OR FX_1 > FZlim THEN
    RETURN work_speed := 10;
ELSE
    RETURN work_speed := 25;
ENDIF
ENDMODULE

MoveL [[466.749,-419.312,135.709],[0,-0.022,1,0],[0,0,1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],
[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[466.749,-419.312,135.511],[0,-0.022,1,0],[0,0,1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],
[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[466.749,-419.312,135.411],[0,-0.022,1,0],[0,0,1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],
[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[466.749,-419.312,135.212],[0,-0.022,1,0],[0,0,1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],
[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[466.749,-419.312,135.113],[0,-0.022,1,0],[0,0,1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],
[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;

ENDMODULE

```

Рисунок 2.8 – Фрагмент управляющей программы

2.2 Обоснование выбора подачи инструмента как параметра управления

Жесткость промышленных роботов значительно уступает классическим станкам с ЧПУ. Поэтому выходное звено значительно смещается под воздействием силы резания. В общем случае сила резания прямо пропорциональна объему снимаемого материала. С учетом этого при неравномерном припуске на обработку при выполнении операции будут области, в которых сила резания будет превышать допустимую величину (рисунок 2.9).

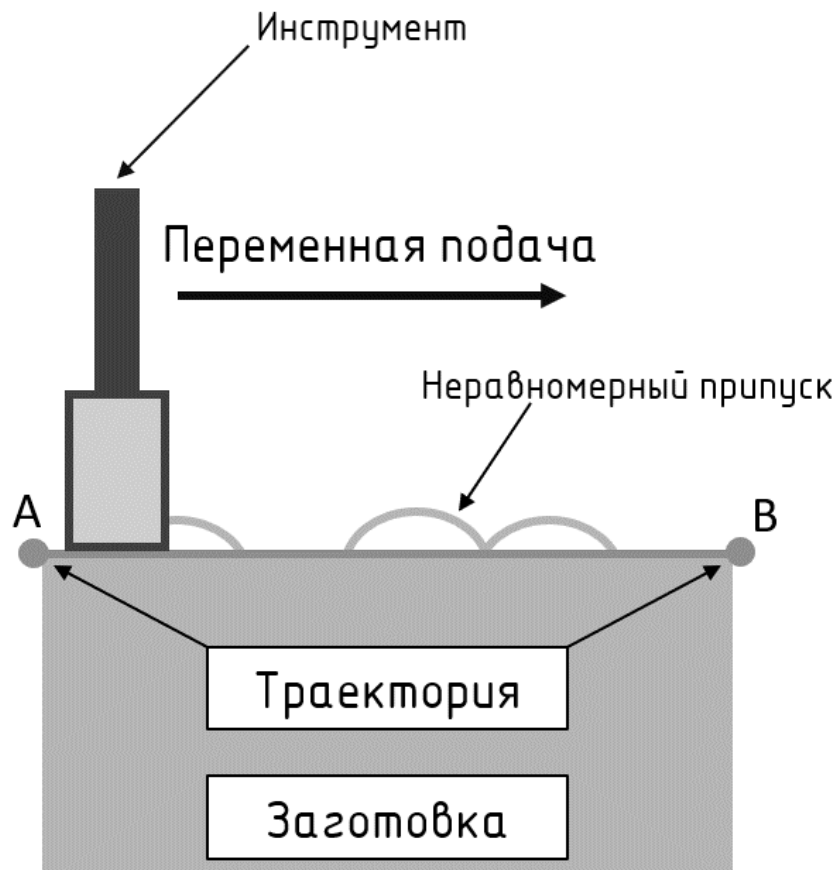


Рисунок 2.9 – Обработка заготовки с неравномерным припуском

При разработке алгоритма адаптивного управления процессом обработки принципиальное значение имеет выбор технологического параметра, посредством изменения которого осуществляется коррекция движения инструмента. В создаваемом алгоритме в качестве параметра управления выбрана подача (скорость перемещения инструмента), что обусловлено комплексом причин, связанных с динамическими особенностями роботизированных систем, кинематическими

ограничениями, природой процесса резания и требованиями к качеству обрабатываемой поверхности.

Динамические и инерционные характеристики роботизированной системы. Промышленные роботы как исполнительные механизмы обладают значительной приведенной массой и моментом инерции подвижных звеньев. Изменение скорости вращения шпинделя (частоты вращения инструмента) сопряжено с необходимостью преодоления инерции вращающихся масс. Процесс разгона или торможения шпинделя до заданной частоты вращения требует определенного времени, которое может быть сопоставимо с длительностью технологического перехода или даже превышать его. Это делает управление по частоте вращения неприемлемым для задач оперативной (онлайн) коррекции, где требуются быстрые реакции на изменение силовых факторов с минимальным запаздыванием.

Кинематическая связанность и геометрическая точность. Управление глубиной резания в процессе обработки представляет собой сложную задачу, поскольку изменение глубины требует позиционирования инструмента в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности. В роботизированных системах это предполагает либо изменение траектории в реальном времени, либо введение дополнительного управляемого перемещения по одной из осей. Такой подход сопряжен с риском нарушения геометрии обрабатываемой поверхности и снижения точности обработки.

Обеспечение стабильности. Использование подачи в качестве управляющего параметра обеспечивает более высокую стабильность и повторяемость результатов обработки при изменяющихся внешних условиях. Коррекция подачи не изменяет геометрию траектории и не требует пересчета управляющей программы, что сохраняет неизменной кинематическую схему обработки и обеспечивает идентичность геометрических параметров поверхности для всех обрабатываемых деталей в партии. При изменении глубины резания или частоты вращения такая стабильность и повторяемость были бы нарушены.

Таким образом, выбор подачи в качестве параметра управления при

адаптивной коррекции режимов роботизированной обработки обусловлен совокупностью факторов: быстродействием системы управления, возможностью плавного регулирования без нарушения геометрии траектории, предсказуемым влиянием на силовые факторы, минимальным воздействием на вибрационную устойчивость, обеспечением стабильности формируемого качества поверхности.

2.3 Экспериментальное исследование одноканальной жесткости оборудования

Как отмечалось в главе 1, жесткость промышленного робота значительно ниже жесткости станков с ЧПУ и является основным источником погрешностей при обработке. Следовательно, отклонение выходного звена под действием внешней силы должно учитываться при работе алгоритма. Кроме того, обработка происходит в условиях неравномерного припуска. Таким образом, алгоритм управления ПР должен учитывать допустимую нагрузку при различных конфигурациях манипулятора и корректировать режимы резания.

В процессе обработки силовые факторы в зоне резания будут поддерживаться в пределах допустимых. При разработке алгоритма управления приняты следующие допущения:

1. Податливость шарниров робота является основным источником отжати.
2. Звенья робота считаем абсолютно жесткими телами.

На первом этапе необходимо определить жесткость ПР под действием статической силы.

Промышленный робот имеет консольную конструкцию и можно полагать, что его жесткость будет уменьшаться по мере увеличения вылета от выходного звена относительно основания.

С целью определения фактической жесткости ПР в лаборатории «Средства автоматизации и промышленные роботы» Московского Политеха были проведены эксперименты (рисунки 2.10 и 2.11).

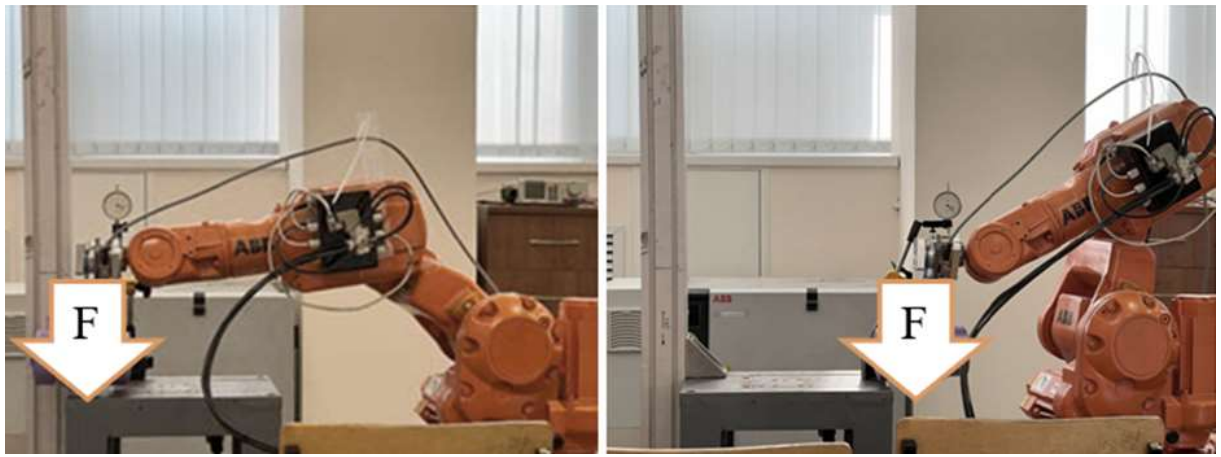


Рисунок 2.10 – Эксперимент по статической нагрузке в направлении оси Z

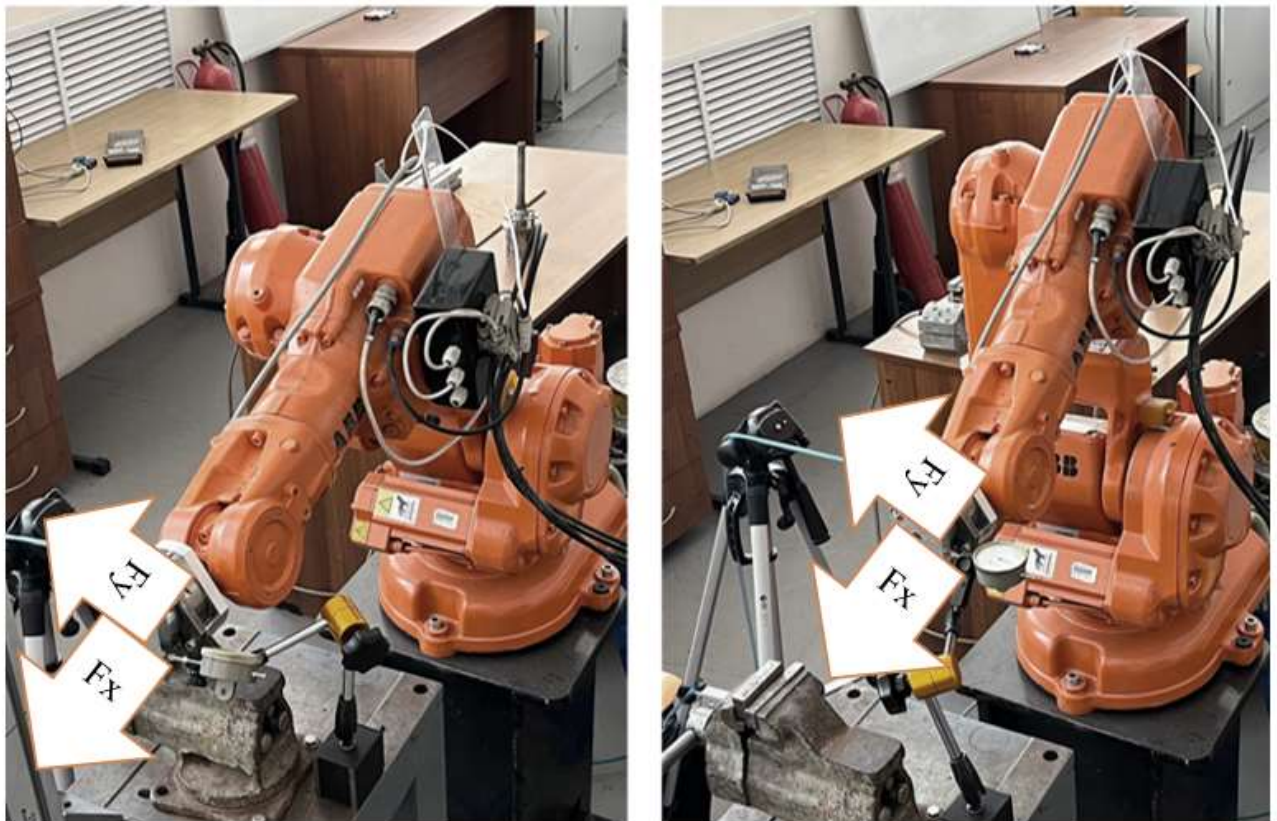


Рисунок 2.11 – Эксперимент по статической нагрузке в направлении оси X и Y

Установка состоит из промышленного робота ABB IRB-140T, неподвижной стойки, грузов, часового индикатора на магнитной стойке с ценой деления 0.01 мм. Изменяя конфигурацию манипулятора по мере удаления выходного звена от основания с шагом 100 мм проводилось нагружение и фиксировалась величина смещения выходного звена. Было установлено, что выходное звено ПР

возвращалось в исходное положение после снятия нагрузки.

В таблице 2.1 приведены результаты экспериментов по статическому нагружению.

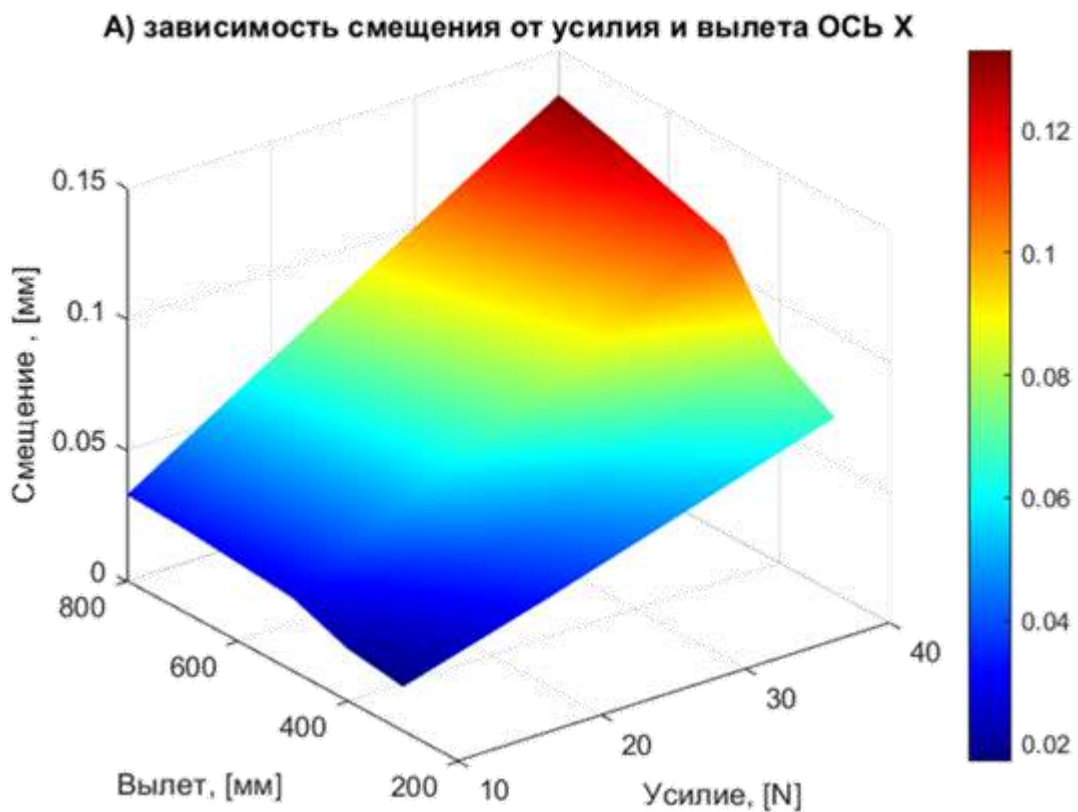
Таблица 2.1 Величины смещений выходного звена ПР при статическом нагружении

№	Сила F, Н	Конфигурация (расстояние до основания, мм)	Δ_x , мм	Δ_y , мм	Δ_z , мм
1	10	1 (300)	0.015	0.013	0.03
2	10	2 (400)	0.02	0.02	0.035
3	10	3 (500)	0.03	0.027	0.04
4	10	4 (600)	0.03	0.03	0.045
5	10	5 (700)	0.03	0.035	0.05
6	10	6 (800)	0.035	0.045	0.07
7	20	1 (300)	0.035	0.03	0.06
8	20	2 (400)	0.04	0.04	0.07
9	20	3 (500)	0.055	0.055	0.075
10	20	4 (600)	0.060	0.06	0.09
11	20	5 (700)	0.065	0.07	0.1
12	20	6 (800)	0.07	0.09	0.13
13	30	1 (300)	0.05	0.04	0.09
14	30	2 (400)	0.06	0.06	0.1
15	30	3 (500)	0.085	0.08	0.11
16	30	4 (600)	0.09	0.09	0.13
17	30	5 (700)	0.095	0.1	0.15
18	30	6 (800)	0.1	0.13	0.2

19	40	1 (300)	0.065	0.055	0.12
20	40	2 (400)	0.08	0.08	0.13
21	40	3 (500)	0.115	0.11	0.145
22	40	4 (600)	0.12	0.12	0.175
23	40	5 (700)	0.13	0.135	0.2
24	40	6 (800)	0.135	0.175	0.27

На основе проведенных экспериментов установлено, что жесткость промышленного робота уменьшается почти в 2 раза. Величина жесткости в определенной конфигурации ПР непосредственно влияет на величину допустимой силы резания.

На основе проведенных экспериментов в MATLAB построены графики зависимости смещения выходного звена от вылета до основания и приложенной внешней нагрузки (рисунок 2.12)



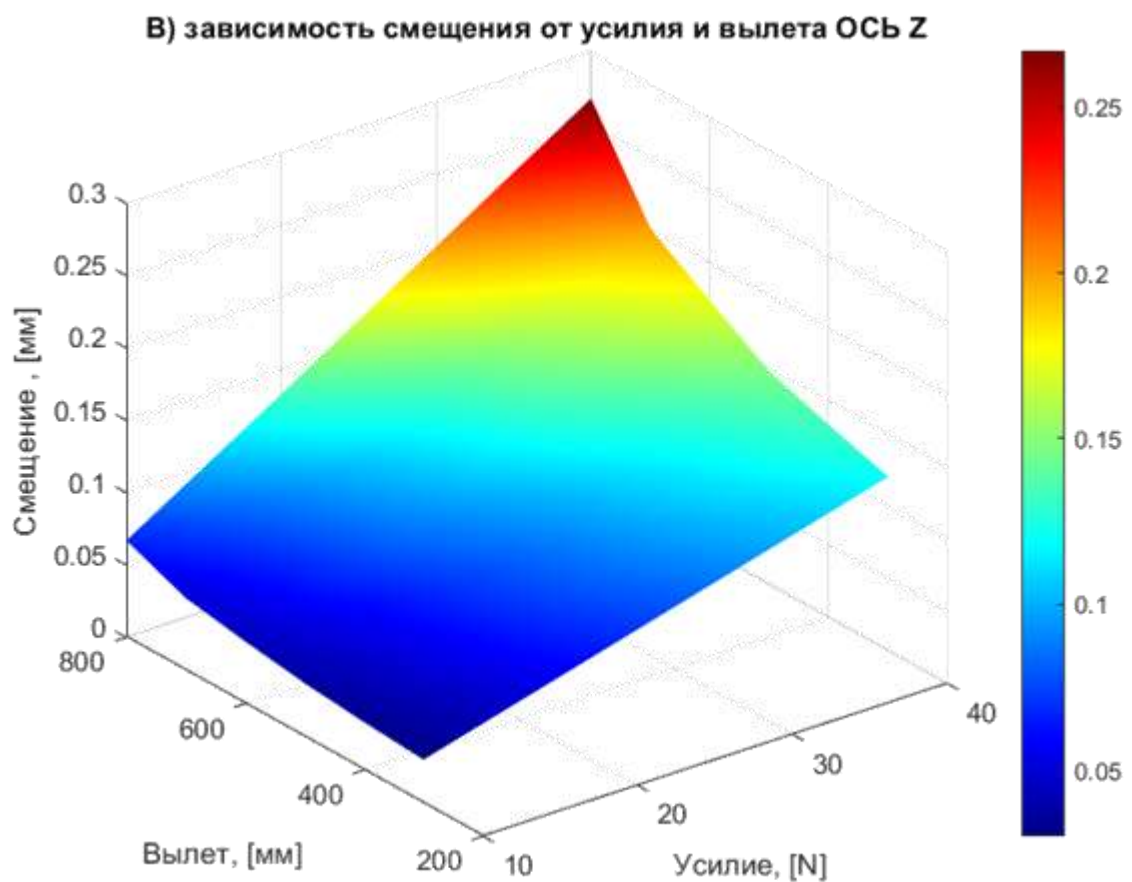
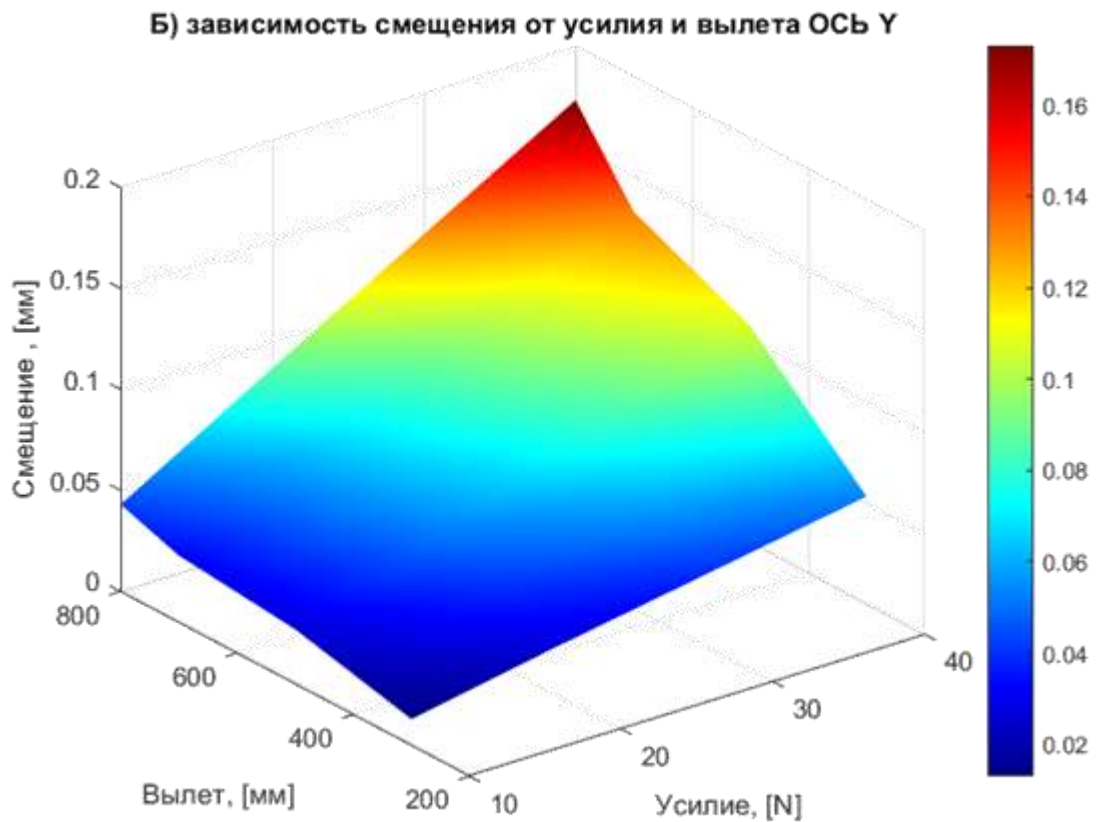


Рисунок 2.12 – Зависимость смещения выходного звена от нагрузки и вылета до основания: а – по оси X; б – по оси Y; в – ось Z.

2.4 Блок-схема алгоритма управления оборудованием с коррекцией технологической подачи

В данной работе поставлена задача обеспечения шероховатости поверхности и размерной точности, следовательно, критически важно идентифицировать силовые факторы в зоне резания.

Эксперименты по статической нагрузке показали, что даже в диапазоне своей полезной нагрузки робот имеет значительные смещения.

На основе экспериментов по одноканальной жесткости промышленного робота разработан алгоритм управления (рисунок 2.13). Алгоритм порогового позиционно-силового управления является дополнением к основному блоку управления промышленного робота, то есть в любом программном обеспечении при наличии набора управляющих команд движения промышленным роботом, возможно дополнить командами для коррекции скорости перемещения выходного звена (технологической подачи).

Структура алгоритма включает следующие блоки:

- блок движения выходного звена (данные из САМ);
- обработчик сигнала с силомоментного датчика;
- блока сравнения силовых факторов с допустимым интервалом в текущей конфигурации робота;
- блок задания технологических режимов на основе проверки силовых условий.

Блок движения выходного звена является источником эталонной траектории и формирует номинальные законы перемещения инструмента в пространстве. Исходными данными для данного блока служат управляющие программы, сгенерированные в CAD/CAM-системах, которые содержат информацию о геометрии обрабатываемой поверхности, траектории движения инструмента и номинальных значениях технологических параметров.

Данный блок задает последовательность дискретных позиций, которые должен последовательно занять инструмент в глобальной системе координат.

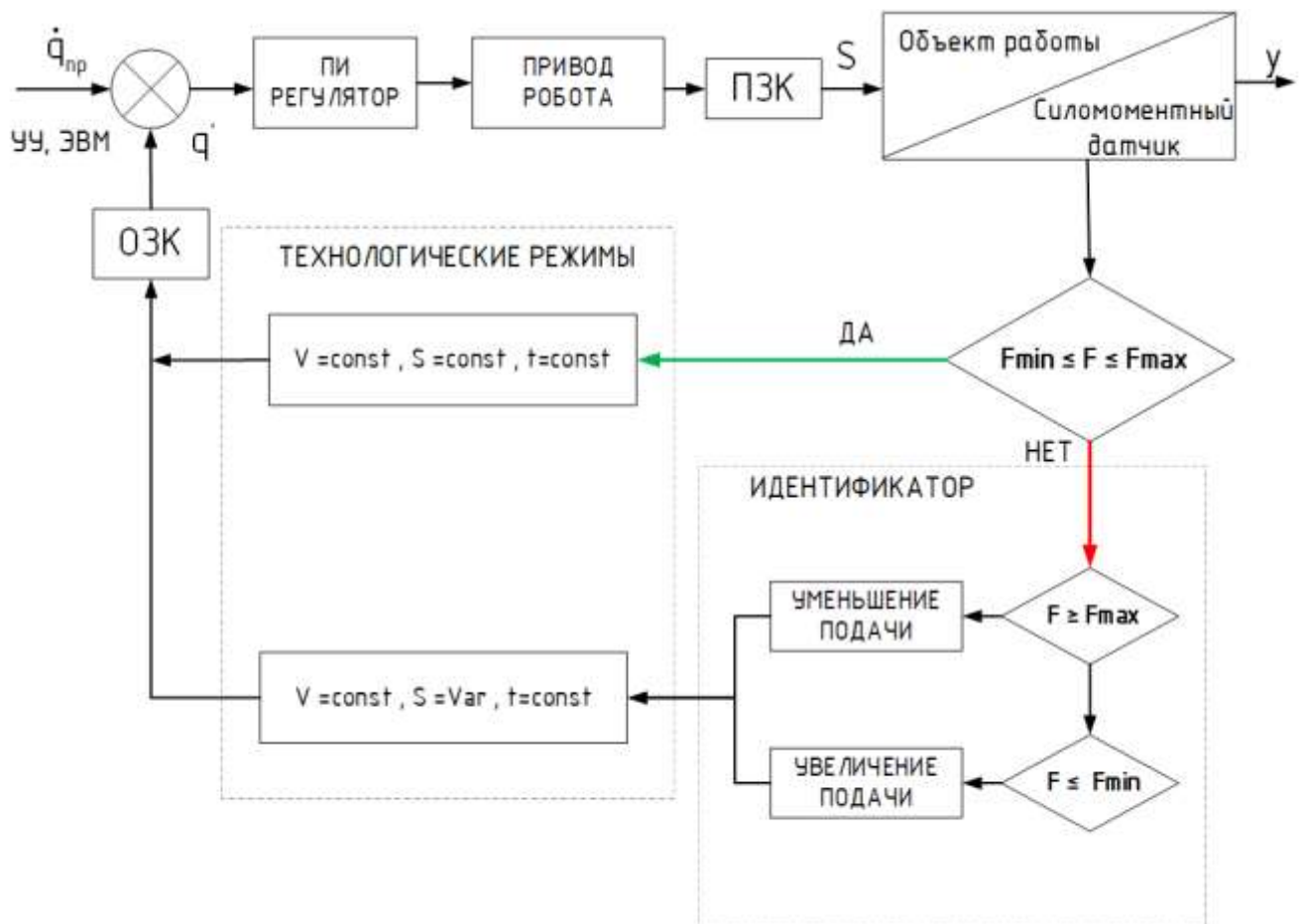


Рисунок 2.13 – Алгоритм управления процессом роботизированной механической обработки с использованием обратной связи: $\dot{q}_{\text{пр}}$ – программная траектория; ОЗК – расчет обратной задачи кинематики; ПЗК – расчет прямой задачи кинематики; q' – сигнал коррекции скорости перемещения выходного звена (технологической подачи); v, S, t – технологические режимы (скорость вращения, подача, глубина резания); $F_{\text{max}}, F_{\text{min}}$ – максимальная и минимальная допустимая сила; F – силовые факторы (выводы силомоментного датчика); y – траектория движения инструмента .

Скорость перемещения выходного звена промышленного робота изменяется нелинейно, а по более сложным законам, потому что помимо перемещения между точками необходимо сохранять плавность, точность, допустимые нагрузки на механику. В случае линейного изменения скорости (треугольный профиль) или резкого роста будут присутствовать рывки в момент начала и окончания движения.

Все это приводит к вибрациям, ошибкам позиционирования и повышенному износу приводов.

Согласно инструкции по эксплуатации ПР АBB IRB-140 выходное звено при начале/окончании движения движется с переменным ускорением. В случае выполнения команды увеличения/снижения скорости закон изменения представлен на рисунке 2.14. Таким образом, возможно реализовать алгоритм порогового управления с коррекцией подачи в зависимости от величины силовых факторов в зоне резания. При этом независимо от дискретных команд на увеличение/снижение скорости будет обеспечена плавность движения за счет настроек приводов, заложенных в систему управления.

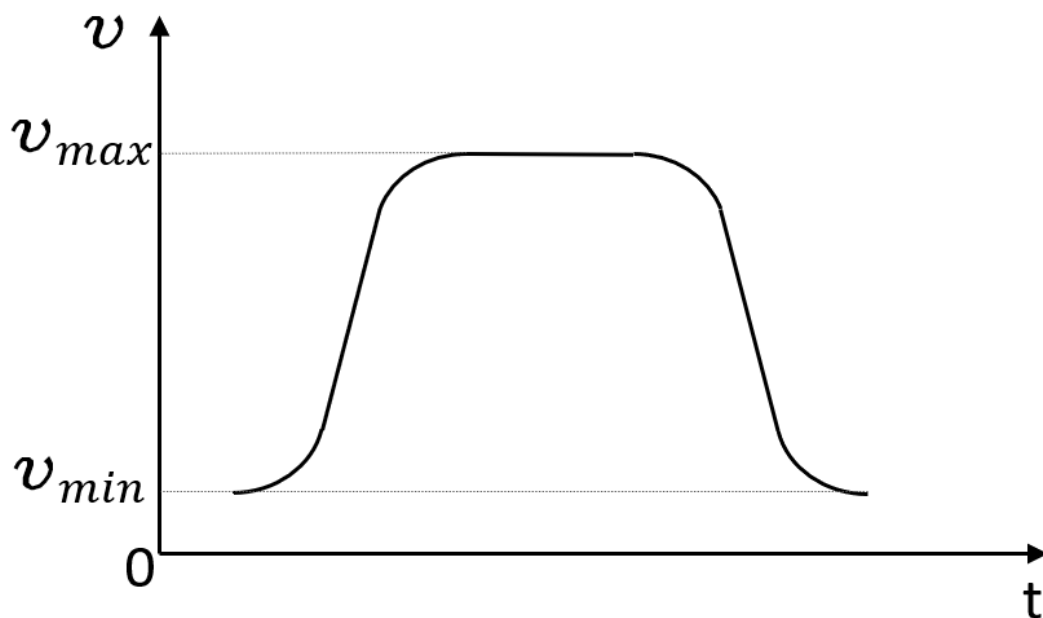


Рисунок 2.14 – Закон изменения скорости движения манипулятора

Обработчик сигнала силомоментного датчика выполняет функции сбора, фильтрации и интерпретации первичных измерений о текущих усилиях и моментах, возникающих в зоне контакта инструмента с заготовкой. Полученная информация о фактических силовых факторах резания поступает в блок проверки условий превышения допустимых сил для последующего анализа и принятия решений.

Эмпирической основой для вычислений служат результаты экспериментальных исследований по определению одноканальной жесткости

промышленного робота, приведенные в таблице 2.1 и предварительные эксперименты обработки.

Блок задания технологических режимов на основе сопоставления фактических силовых факторов с допустимыми является центральным регулирующим элементом алгоритма. В данном блоке выполняется сравнение двух потоков информации: текущих величин сил резания, полученных от обработчика сигналов датчика и предельных значений сил. На основе результатов этого сравнения формируется управляющее воздействие по коррекции технологических параметров.

Если при сравнении сила находится в заданном диапазоне, то величина подачи остается без изменений. В случае когда силовые факторы находятся вне допустимого интервала:

- подача уменьшается если силовые факторы больше либо равны максимальной допустимой силе;
- подача увеличивается если силовые факторы меньше либо равны минимальной допустимой силе.

Процесс обработки реализуется как циклическое пошаговое перемещение инструмента относительно глобальной системы координат в соответствии с траекторией, заданной блоком движения. На каждом дискретном шаге текущие измеренные силовые факторы сопоставляются с предельно допустимыми для данной конфигурации величинами. В случае превышения порогового значения сил для данного положения робота, происходит коррекция подачи инструмента, то есть изменения скорости перемещения промышленного робота.

Снижение скорости подачи приводит к уменьшению съема и, соответственно, к снижению значений силовых факторов в зоне резания. Это, в свою очередь, уменьшает величину упругих деформаций манипулятора, что непосредственно повышает точность позиционирования промышленного робота по программной траектории.

Важной особенностью предложенного алгоритма является то, что описанная программная коррекция выполняется в онлайн-режиме, то есть непосредственно в

процессе выполнения рабочего цикла обработки без остановки технологической операции. Это обеспечивает непрерывную адаптацию функционирования роботизированной системы к локальным изменениям жесткости по траектории.

Таким образом, реализуется принцип контроля силовых факторов. Ниже представлены выводы СМД и зоны переменной подачи при превышении допустимой величины силы (рисунок 2.15).

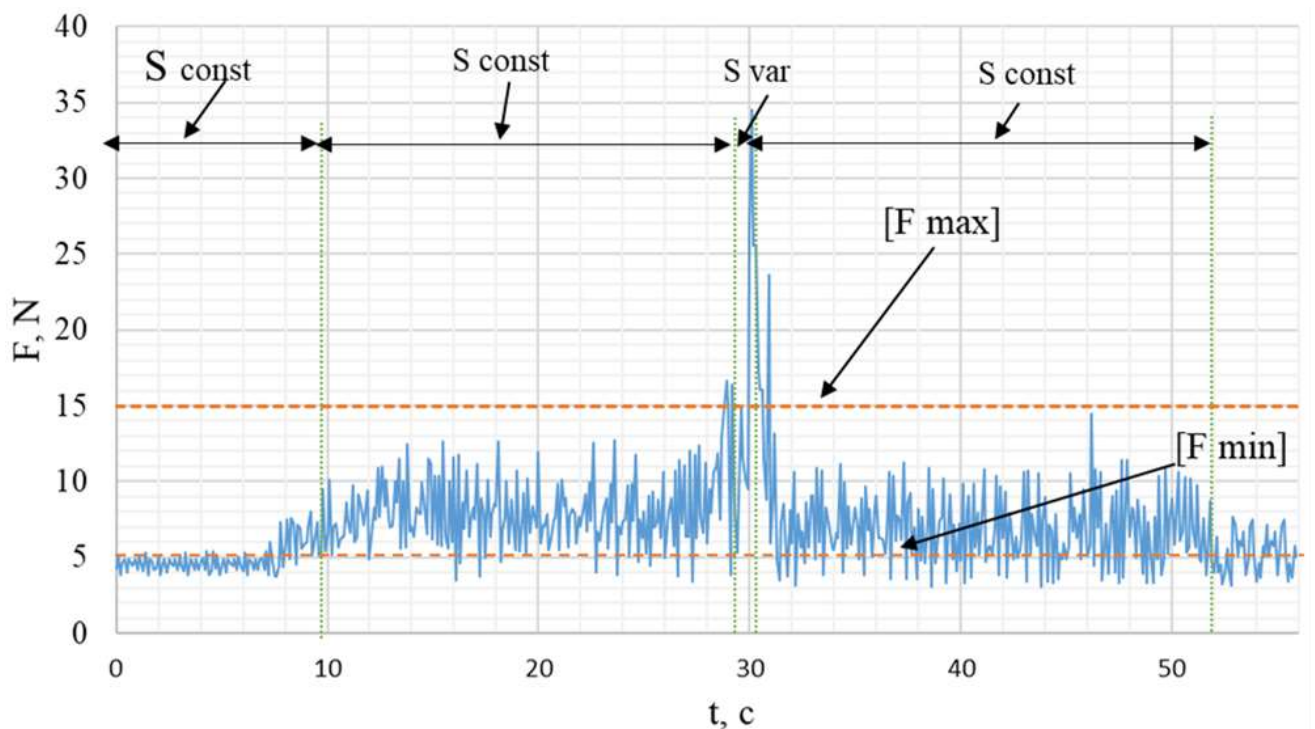


Рисунок 2.15 – Выводы силомоментного датчика при обработке

На рисунке 2.15 показаны выводы силомоментного датчика при подводе к участку с неравномерным припуском. Зона 0...10 демонстрирует этап подвода инструмента к заготовке. Зоны 10...30 и 30.5...56 показывают величину и колебания сил резания при обработке твердым инструментом с расчетными режимами резания. В момент попадания в зону неравномерного припуска подача меняется ввиду превышения допустимой силы. При этом инструмент может как замедляться, так и ускоряться до расчетной величины подачи в зависимости от величины силовых факторов в зоне резания. Величина минимальной подачи была определена на основе пробных экспериментов с учетом технологических возможностей оборудования.

2.5 Выводы по главе 2

1. При дооснащении промышленного робота силомоментным датчиком и организации порогового позиционно-силового управления возможна идентификация фактической силы резания для коррекции подачи.

2. При использовании стойки управления и разработанного постпроцессора возможно дополнить управляющую программу алгоритмом порогового силового управления, который позволит контролировать силовые факторы в зоне резания и управлять движением инструмента.

3. Варьирование подачи инструмента возможно на основе применения закона изменения скорости движения манипулятора, что позволяет избежать возникновения колебаний оборудования при изменении скорости.

4. На основе экспериментов по одноканальной жёсткости установлено изменение жесткости оборудования более чем в два раза, поэтому выбор рациональных технологических режимов должен быть обусловлен не только типом технологической операции, но и интервалом допустимых значений силовых факторов.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОСНАЩЕНИЕ И АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ

3.1 Описание экспериментальной установки

Верификация разработанного алгоритма управления осуществлялась в ходе экспериментальных исследований на специализированном стенде, который представлен на рисунке 3.1. Базовым элементом является промышленный робот-манипулятор ABB IRB-140T (поз. 1), выполняющий технологическую операцию механической обработки. Технические характеристики робота представлены в таблице 3.1. Для регистрации силовых параметров процесса на выходном звене манипулятора установлен многокомпонентный силомоментный датчик FTN-AXIA80 SI500-20 Ethernet (поз. 2). Технические характеристики силомоментного датчика приведены в таблице 3.3. Датчик обеспечивает измерение усилий и крутящих моментов, возникающих при обработке. Базирование и закрепление экспериментальных образцов осуществляется специальным приспособлением (поз. 3), конструкция которого позволяет осуществлять обработку при различном вылете выходного звена робота, обеспечивая тем самым проведение исследований при различных положениях робота. Информация о силовых факторах, измеряемых силомоментным датчиком поступают в контроллер IRC5. Технические характеристики системы управления приведены в таблице 3.2. Информация с СМД поступает также в компьютер, подключенный к контроллеру ПР.

Таблица 3.1 – Технические характеристики промышленного робота ABB IRB-140T

Параметр	Значение
Количество осей	6 осей, каждая с индивидуальным приводом
Тип приводов манипулятора	Электромеханический (сервопривод)
Размеры рабочей зоны	Сфера радиусом 810 мм
Грузоподъемность	6 кг

Точность позиционирования	0,03 мм
Максимальная скорость перемещения фланца	2,5 м/с (7 м/с)
Тип шпинделя	Электрический асинхронный с воздушным охлаждением
Напряжение питания/ Потребляемая электрическая мощность	380В / 0.8 кВт

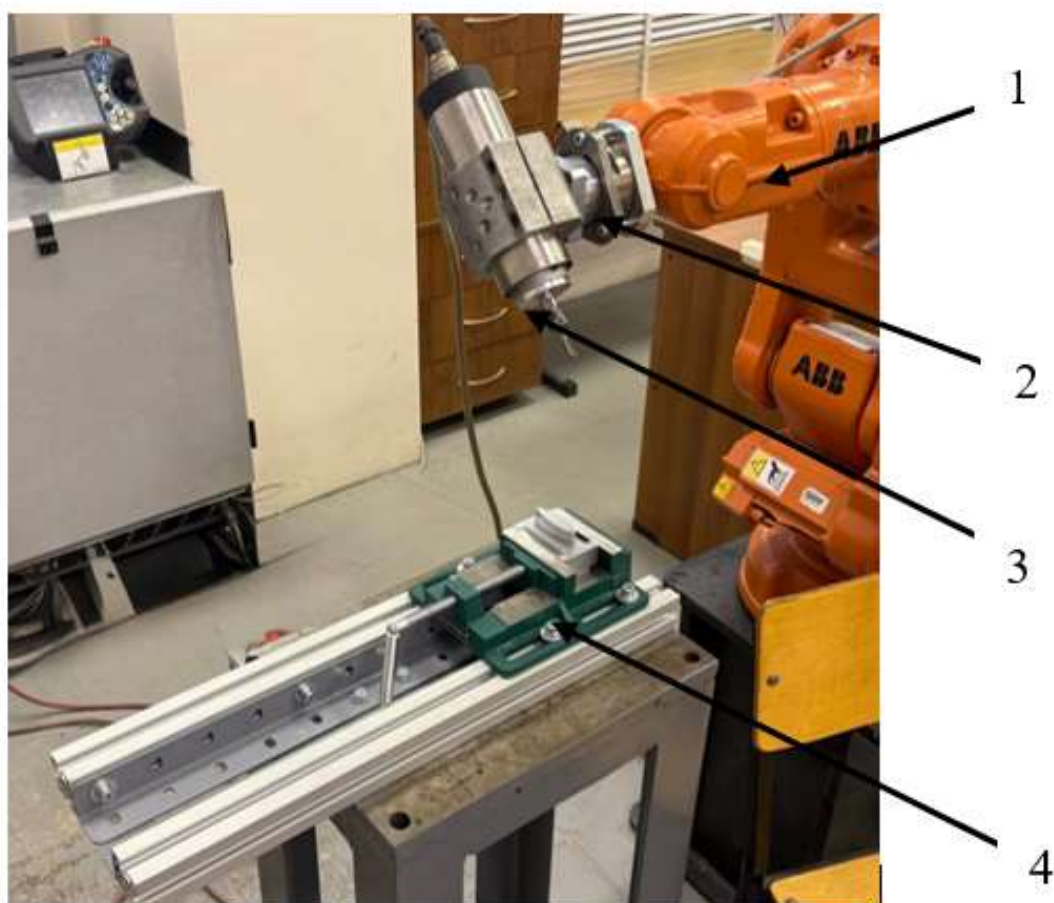


Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка для исследования роботизированной обработки: 1 – робот ABB IRB 140T; 2 – силомоментный датчик FTN – AXIA80 SI500-20 Ethernet; 3 – шпиндель GDF65-24000-0.8кВт; 4 – приспособление с установленной заготовкой

Таблица 3.2 – Технические характеристики контроллера IRC5

Параметр	Значение
Габариты (В x Д x Ш)	0,970 x 0,725 x 0,710 м

Масса	150 кг
Напряжение питания	3 фазный источник тока 0,4кВ, 50-60 Гц
Дополнительные опции безопасности	Электронные позиционные переключатели: 5 выходов слежения за осями 1-7
Безопасное перемещение	8 входных функциональных каналов 8 выходных каналов мониторинга безопасности
Подключение к ПК	Ethernet
Подключение датчиков и доп. оборудования	Ethernet

Для решения поставленной задачи применялся силомоментный датчик модели FTN- AXIA80 SI-200-8 / SI-500-20 Ethernet (арт. 1324513) (рисунок 3.2).

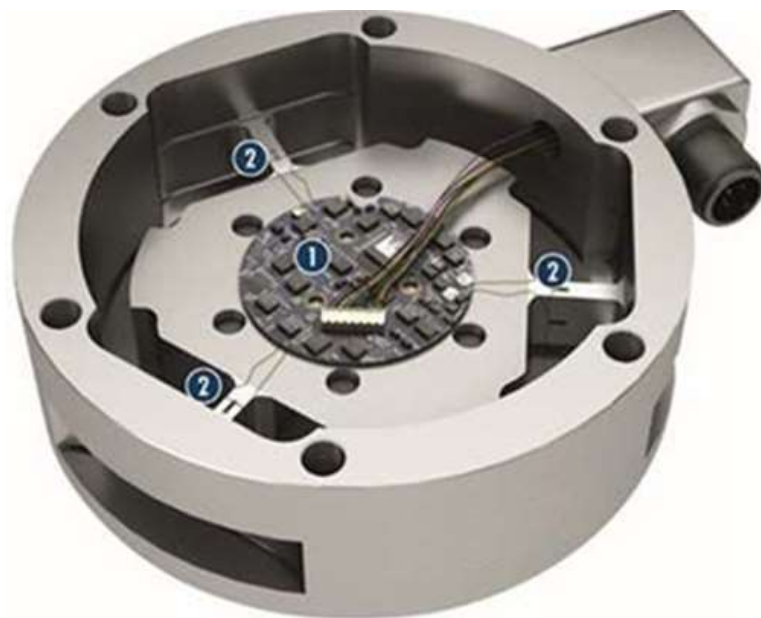


Рисунок 3.2 – Силомоментный датчик модели FTN-AXIA80 SI-200-8 / SI-500-20 Ethernet

Таблица 3.3 – Технические характеристики СМД модели FTN-AXIA80

Главный параметр		
ID	1324 513	
Анализ посредством	EtherNet	
Масса, кг	0,3	
Калибровка	1 (SI-200-8)	0 (SI-500-20)
Диапазон измерений Fx, Fy [Н]	200	500

Диапазон измерений Fz [Н]	360	900
Диапазон измерений Mx, My [Нм]	8	20
Диапазон измерений Mz [Нм]	8	20
Перегрузка Fx, Fy [Н]	±250	
Перегрузка Fz [Н]	±450	
Перегрузка Mx, My [Нм]	±100	
Перегрузка Mz [Нм]	±100	
Разрешение Fx, Fy [Н]	1/10	
Разрешение Fz [Н]	1/10	
Разрешение Mx, My [Нм]	1/20	
Разрешение Mz [Нм]	1/20	
Главный параметр		
Резонансные част. Fx, Fy, Mz [Гц]	2200	
Резонансные част. Fz, Mx, My [Гц]	2600	

В качестве инструмента использована твердосплавная концевая фреза и абразивный круг (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Инструмент для обработки: а – твердосплавная фреза; б – твердый абразивный круг

Выбор инструмента определялся следующими причинами:

1) Аналогичный инструмент широко применяется в производстве корпусных деталей на зачистных, слесарных операциях.

2) Конструкция инструмента является жесткой и позволяет применять позиционно-силовое управление.

3.2 Калибровка датчика и фильтр сигнала

Первичный доступ к веб-интерфейсу силомоментного датчика ATI Ethernet Axia F/T и его конфигурирование осуществлялись посредством процедуры инициализации сетевых параметров, включающей назначение статического IP-адреса и задание базовых параметров подсети.

Датчик поставляется с фиксированным заводским IP-адресом 169.254.5.178. С целью обеспечения сетевой доступности устройства производилось временное переконфигурирование сетевого интерфейса управляющего компьютера в соответствии со следующей процедурой:

1. Кабель Ethernet, соединяющий компьютер с внешней локальной сетью, отключался от LAN-порта.

2. Осуществлялся вход в меню конфигурации сетевого адаптера операционной системы Windows® (версии 7, 8, 10):

- «Пуск» затем раздел «Панель управления»;
- категория «Сеть и Интернет»;
- переход в раздел «Центр управления сетями и общим доступом»;
- переход по ссылке «Просмотр состояния сети и задач»;
- выбор активного сетевого подключения «Подключение по локальной сети»;
- в открывшемся диалоговом окне состояния подключения активировалась кнопка «Свойства»;
- в списке компонентов, используемых данным подключением, на вкладке «Сеть» производился выбор пункта «Протокол Интернета версии 4 (TCP/IPv4)» (см. рисунок 3.4);

- для перехода к редактированию параметров повторно нажималась кнопка «Свойства» (см. рисунок 3.4).

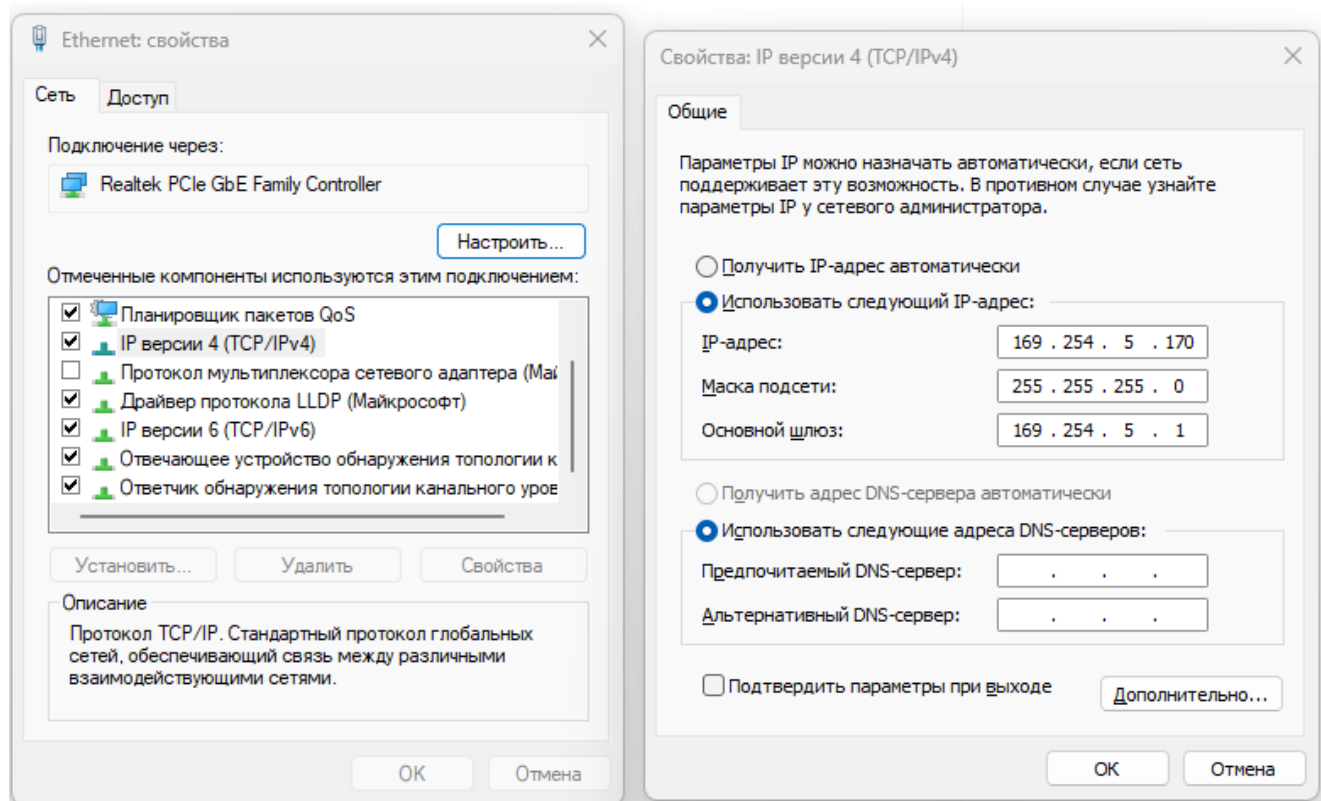


Рисунок 3.4 – Настройки конфигурации устройства в сети Windows 7/8/10

3. Сохранение исходной конфигурации сетевого интерфейса: зафиксированные значения параметров протокола TCP/IP (IP-адрес, маска подсети, основной шлюз), отображаемые в окне свойств, записывались в протокол настройки.

4. Задание статического IP-адреса управляющего компьютера. В окне редактирования параметров протокола TCP/IPv4 переключатель режима адресации устанавливался в положение «Использовать следующий IP-адрес». Производилось заполнение полей следующим образом:

- «IP-адрес» — значение 169.254.5.170;
- «Маска подсети» — значение 255.255.255.0;
- «Основной шлюз» — значение 169.254.5.1.

Внесенные изменения подтверждались последовательным нажатием кнопки «ОК» в окне свойств протокола TCP/IPv4 и повторным нажатием кнопки «ОК» в

окне «Свойства подключения по локальной сети».

5. Подключение датчика и проверка связи: После завершения конфигурирования сетевого интерфейса компьютера производилось физическое подключение датчика к LAN-порту посредством кабеля Ethernet. Системе предоставлялось время, необходимое для обнаружения подключенного устройства и установления канала связи.

6. Верификация подключения и доступ к веб-интерфейсу: Для проверки корректности выполненной настройки в адресную строку веб-браузера вводился IP-адрес датчика 169.254.5.178. Наличие соединения подтверждалось загрузкой стартовой страницы веб-интерфейса датчика Ethernet Axia F/T (см. рисунок 3.5).

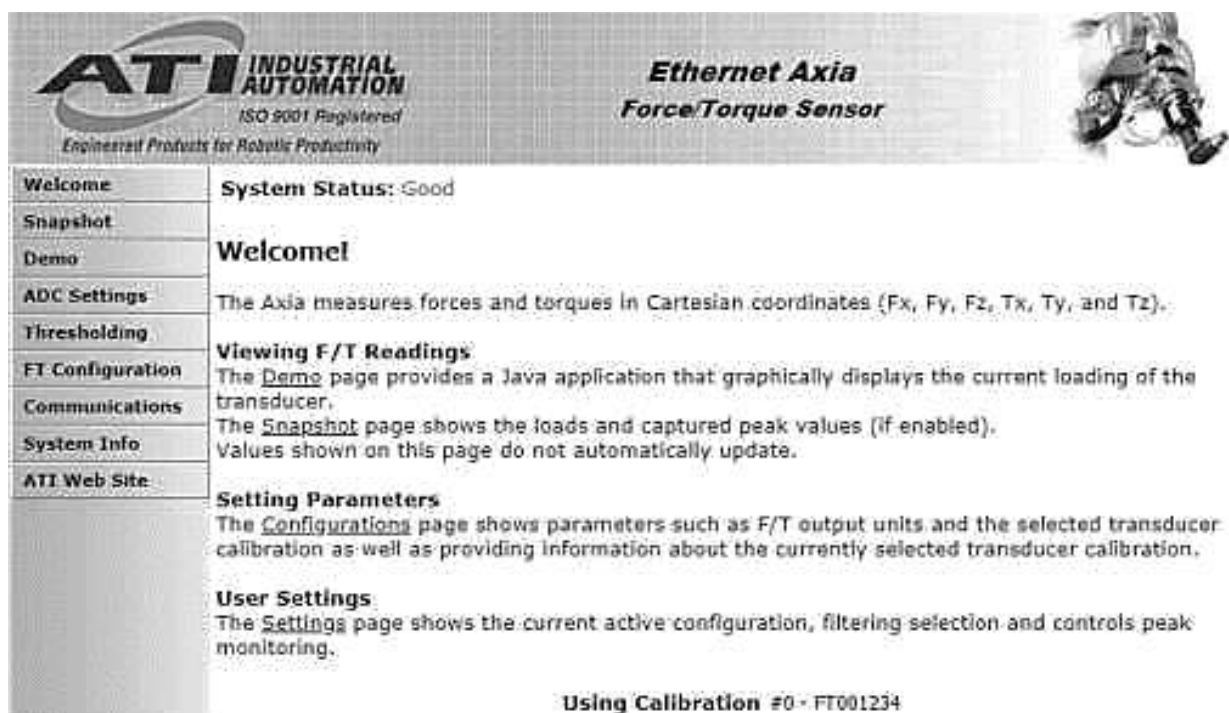


Рисунок 3.5 – Страница датчика Ethernet Axia F/T

Стартовая страница веб-интерфейса датчика *Ethernet Axia F/T* содержит панель навигации, обеспечивающую доступ к основным функциональным разделам устройства. Ключевым элементом управления режимами измерения является страница «ADC Settings» (Настройки АЦП), интерфейс которой представлен на рисунке 3.6. На странице «ADC Settings» пользователю

предоставляется возможность задания следующих параметров:

- выбор активной калибровки (Active Calibration)— определение набора калибровочных коэффициентов, применяемых к выходному сигналу;
- установка частоты дискретизации АЦП (ADC Sample Rate)— задание периодичности опроса аналого-цифрового преобразователя;
- настройка частоты среза фильтра нижних частот (Low-Pass Filter Cutoff Frequency)— определение полосы пропускания измерительного канала;
- ввод значений программного смещения (Software Bias Values)— компенсация постоянной составляющей сигнала (например, веса инструмента).

Активация внесенных изменений осуществлялась нажатием кнопки «Применить» (Apply). Подтверждение команды инициировало процесс записи выбранных параметров в энергонезависимую память датчика, после чего устройство переходило к функционированию в соответствии с заданной конфигурацией.

System Status: Good

ADC Settings

These system settings are independent of configurations and affect all transducer readings.

Values are not stored unless the *Apply* button is clicked.

User Setup:						
Active Calibration	#0 - FT001234 ▾					
ADC Sampling Frequency:	976 ▾	Hz				
Low-Pass Filter Cutoff Frequency:	▾	Hz				
Software Bias Values:	Fx	Fy	Fz	Tx	Ty	Tz
	0	0	0	0	0	0
Force/Torque Counts						
Apply Cancel						

Рисунок 3.6 – Страница «ADC Settings»

Скорость передачи данных — это скорость вывода данных по сети Ethernet. Если скорость передачи данных выше частоты дискретизации, клиент видит

дублирующиеся выборки, передаваемые по сети, до тех пор, пока не будет считана следующая выборка внутри системы. Более высокая скорость передачи данных может быть полезна для того, чтобы датчик передавал данные с той же скоростью, что и другие устройства в системе. Например, если дискретное устройство ввода-вывода в той же сети, что и датчик Ethernet FT-AXIA 80, выдает данные с частотой 7000 Гц, клиент может захотеть, чтобы датчик Ethernet FT-AXIA 80 также выдавал данные в сеть с частотой 7000 Гц, даже если датчик не производит дискретизацию с такой же скоростью внутри системы. Если частота дискретизации выше скорости передачи данных, устройство не получает данные от каждой внутренней выборки по сети.

Однако любые включенные фильтры работают на основе более высокой внутренней частоты дискретизации, поэтому датчик отфильтровывает высокочастотные источники шума, чем если бы фильтр работал на более низкой скорости передачи данных.

Частота среза 3 дБ (логарифмическая единица для сравнения мощностей сигнала) зависит от выбранной частоты дискретизации, которая определяется в разделе «Частота дискретизации». Это стандартный способ указания границы пропускания. Частоты среза для различных частот дискретизации указаны в таблице 3.4.

Таблица 3.4 Частоты среза в зависимости от частоты дискретизации

	488 Гц	976	1953	3906	7912
Частота среза	200	350	500	1000	2000

При работе без фильтров происходит наложение получаемых сигналов СМД. В таком случае нельзя утверждать о достоверности результатов. Значение 3дБ соответствует уменьшению мощности сигнала в два раза. Применение фильтров необходимо для отсекаания высоких частот и корректной оцифровки сигнала силомоментного датчика. Характеристики фильтров для частоты 7912 Гц показаны на рисунке 3.7.

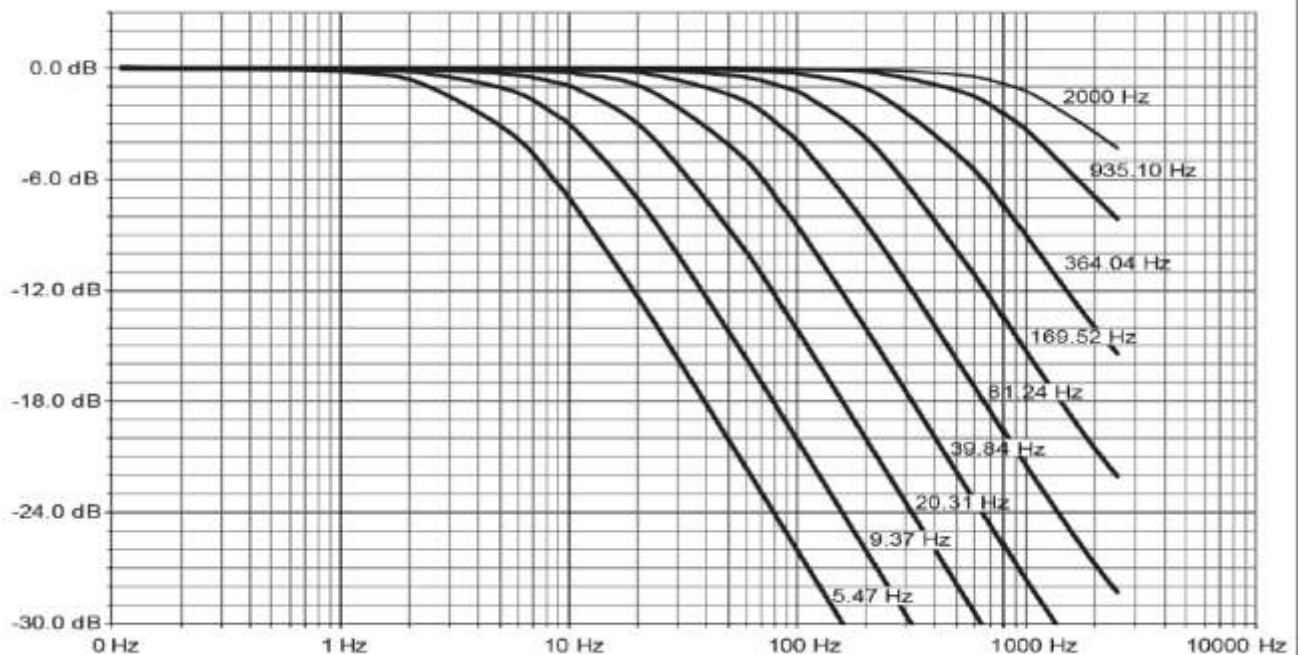


Рисунок 3.7 – Характеристики фильтра датчика FTN-AXIA80 на частоте 7912Гц.

3.3 Последовательность проведения эксперимента

Эксперименты проводились в следующем порядке:

1. Для валидации траекторий на соответствие модели кинематики промышленного робота проводилась обработка гладкой заготовки. По результатам измерялись размерная точность и шероховатость.

2. Проводилась обработка гладких заготовок с различными технологическими режимами. По результатам экспериментов измерялись размеры и шероховатость поверхности после обработки.

3. Проводилась обработка заготовки с неравномерным припуском с использованием разработанного алгоритма. По результатам экспериментов измерялись размеры и шероховатость обработанной поверхности. Для проверки адекватности алгоритма проводилась обработка заготовок с различной высотой припуска.

3.4 Экспериментальная апробация алгоритма управления

Для проверки работоспособности алгоритма заготовка выполнялась в форме эллипса. Обработывалась выпуклая поверхность за одну установку. Заготовка была изготовлена из материала Д16Т (рисунки 3.8 и 3.9). Размеры малой полуоси X находились в диапазоне 15.89...15.95 мм и полуоси Y в диапазоне 59.9 ... 59,95 мм (большая ось). Шероховатость поверхности находилась в диапазоне R_a 2...5 мкм (рисунок 3.8).

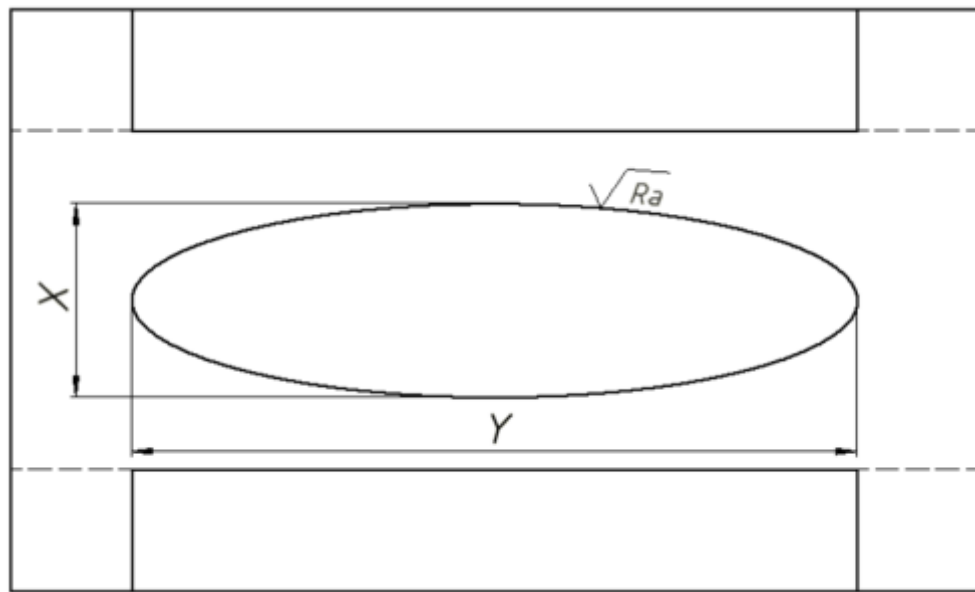


Рисунок 3.8 – Схема измерений

В ходе пробных экспериментов проводилась обработка при различных технологических режимах. В случаях, когда величина силовых факторов в зоне резания была сопоставима с грузоподъемностью манипулятора, наблюдалась вибрация оборудования и отмечалась волнистость на обработанной поверхности (рисунок 3.10, а).

Таблица 3.5 Технологические режимы обработки при пробных экспериментах

Вариант 1			Вариант 2		
V, об/мин	S, мм/мин	t, мм	V, об/мин	S, мм/мин	t, мм
7500	50	0.5	7500	120	0.1



Рисунок 3.9 – Заготовка для пробных экспериментов

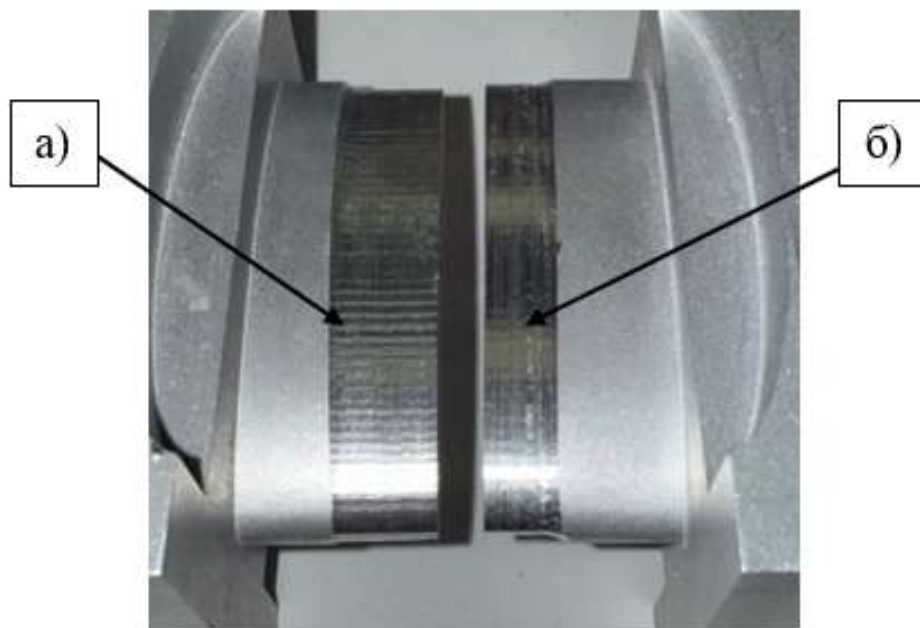
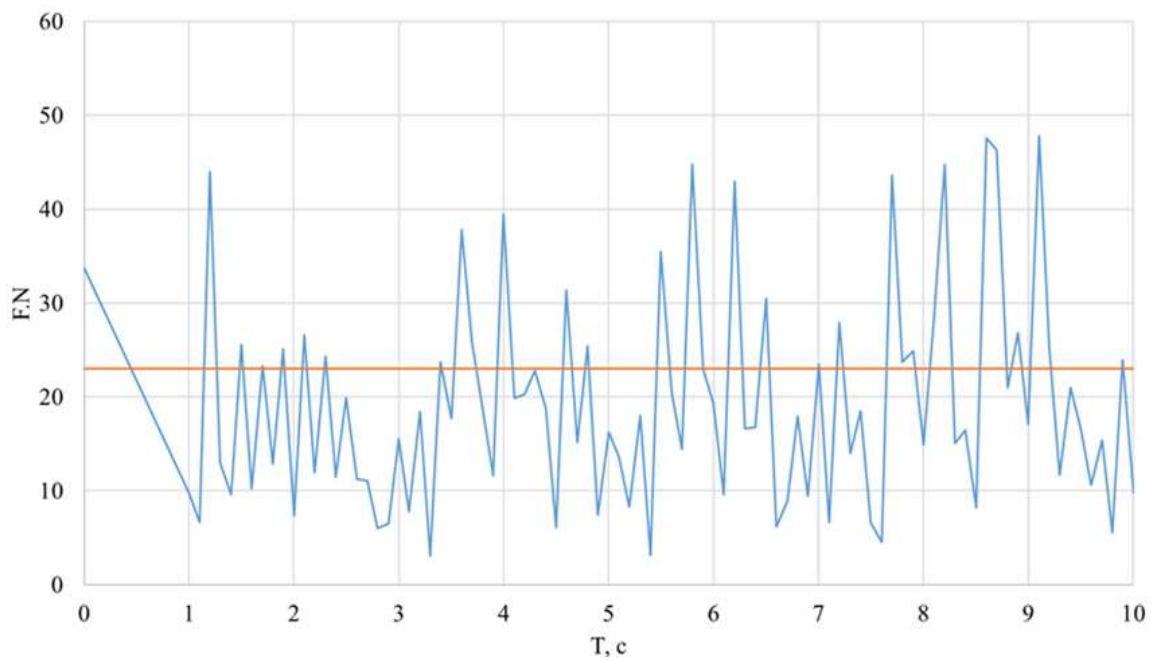
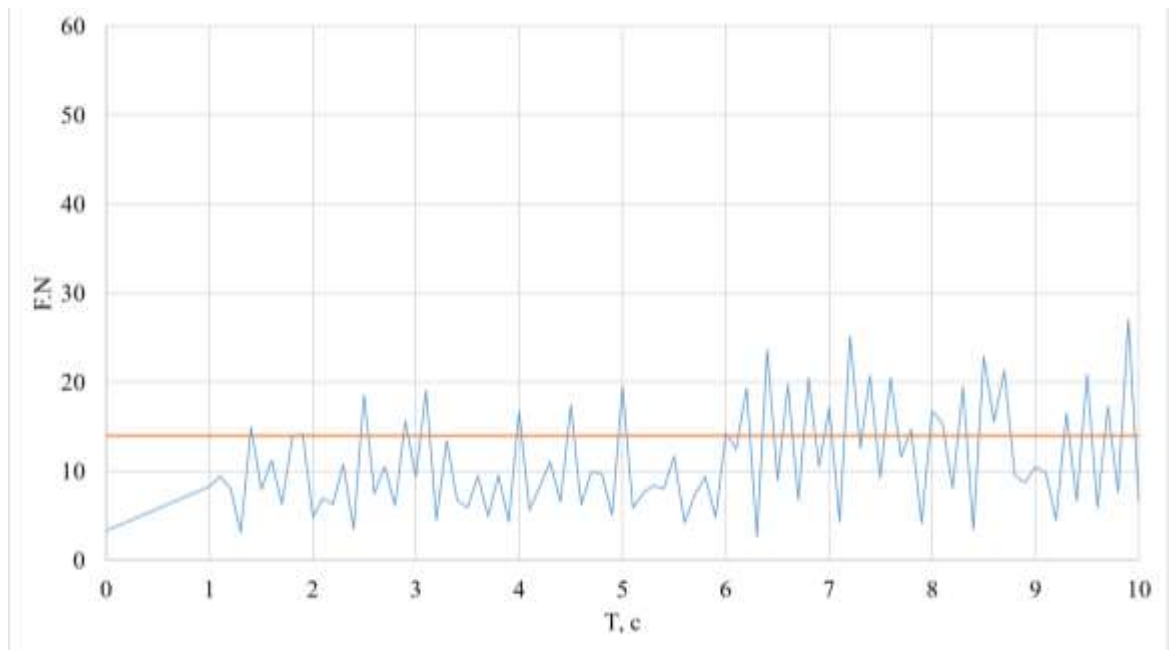


Рисунок 3.10 Состояние поверхности образца после обработки: а – при наличии вибраций во время обработки; б – при стабильном процессе обработки

В процессе обработки выполнялся онлайн мониторинг значений силовых параметров в зоне резания (рисунок 3.11). На основе выводов СМД установлено, что для первого варианта процесс резания был нестабильным с возникновением вибраций выходного звена манипулятора.



а)



б)

Рисунок 3.11 Выводы силомоментного датчика при пробных экспериментах:
а – при наличии вибраций; б – при стабильном процессе

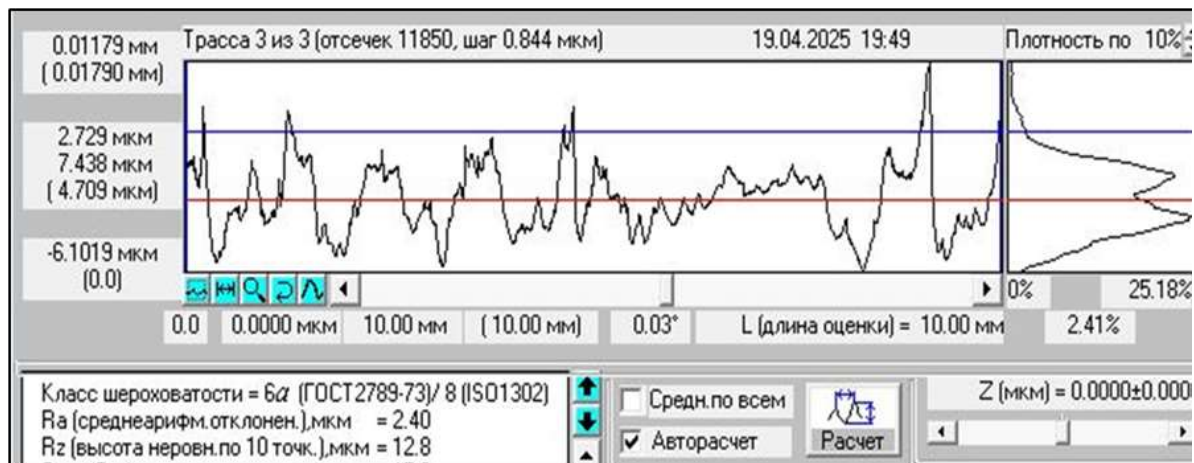
На основе результатов предварительных экспериментов можно утверждать, что применение алгоритма управления и подбор рациональных режимов резания снижает значения силовых факторов на чистовом проходе. Снижение величин силовых факторов в зоне обработки положительно влияет на точность и качество

обрабатываемой поверхности.

На основе выводов с СМД рассчитывалось среднее значение силы за установленный промежуток времени. Получены следующие результаты:

1. В случае, когда наблюдались вибрации инструмента $F_{cp} = 23 \text{ Н}$.
2. При пороговом позиционно-силовом управлении и коррекции технологических режимов $F_{cp} = 14 \text{ Н}$.

Для оценки качества поверхности проводились измерения шероховатости поверхности (рисунок 3.12). На основе измерений установлено, что шероховатость поверхности R_a , при отсутствии вибраций обеспечивает требуемое качество поверхности.



а)



б)

Рисунок 3.12 Профилограмма обработанной поверхности: а – R_a 2.4 мкм вибрации во время обработки; б – R_a 0.9 мкм при стабильном процессе обработки.

Следующим этапом валидации работоспособности алгоритма была обработка заготовок с неравномерным припуском. Искусственные неровности были сформированы путем наплавки. Изменения физико-механических свойств заготовки с наплавкой не оценивались.

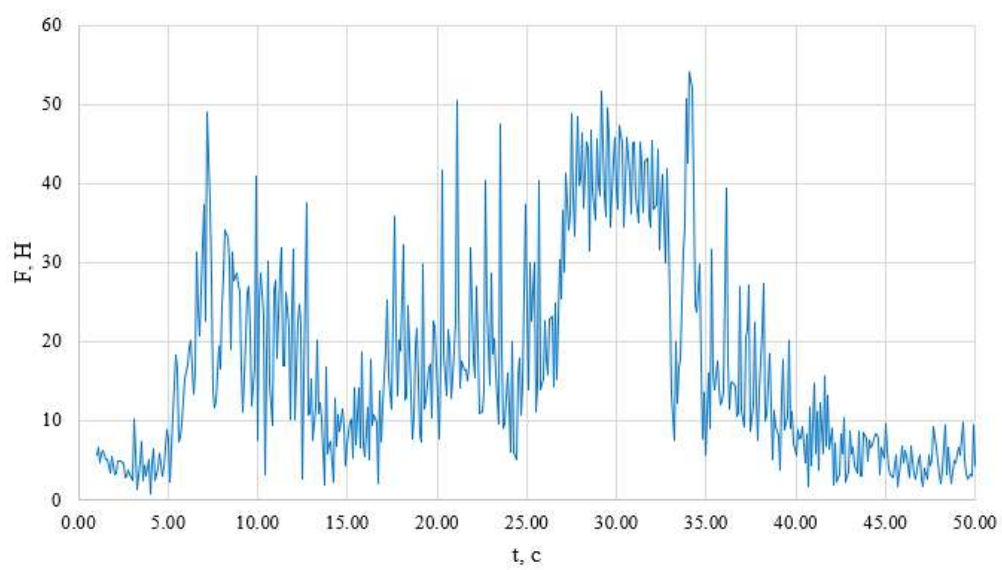
Обработка проводилась за два прохода, размеры, заданные в программе по оси X – 15мм, по оси Y – 59 мм.

Замеры величин неравномерного припуска заготовок представлены в таблице 3.6.

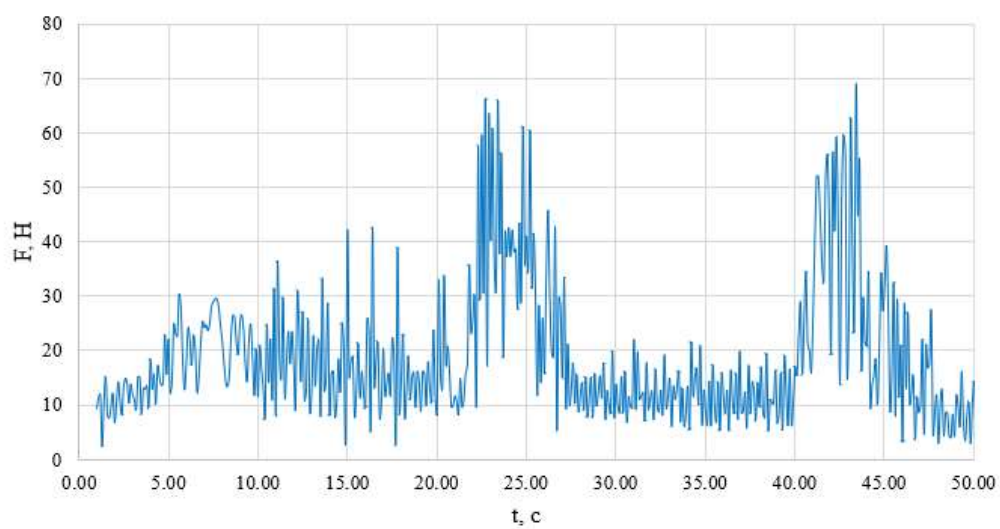
Таблица 3.6 Величины неравномерного припуска заготовок

№		Диапазон высот, мм
1	1	0,1 ... 0,25
	2	
	3	
2	4	0,3 ... 0,5
	5	
	6	
3	7	0,15 ... 0,27
	8	
	9	
4	10	0,4...0,63
	11	
	12	

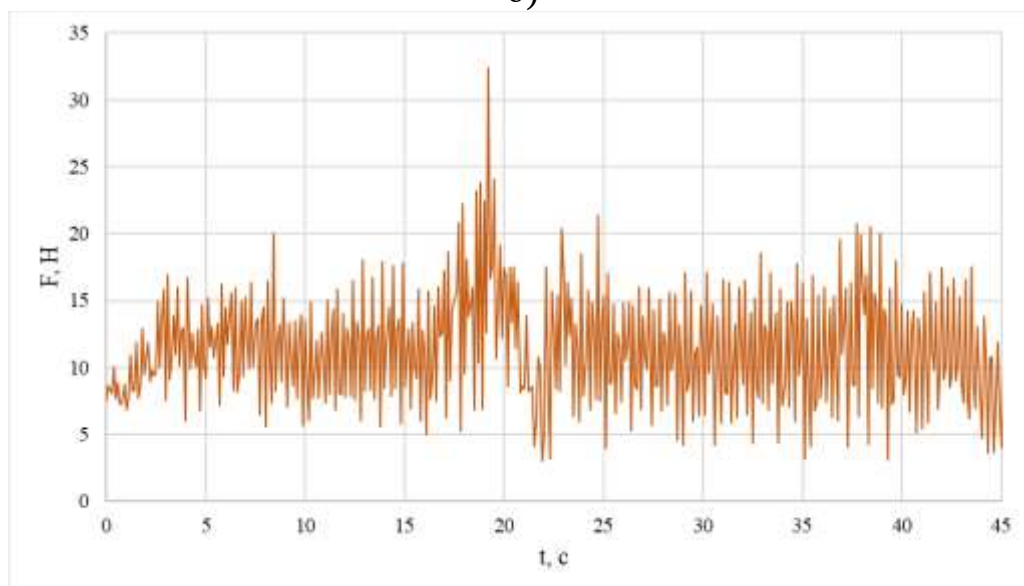
Аналогично, пробным экспериментам в случае резкого превышения силы резания возникали колебания оборудования (рисунок 3.13 а, б). Это не позволяло обеспечить точность и шероховатость обработанной поверхности. Также визуально наблюдалась волнистость обработанной поверхности. При обработке с использованием алгоритма порогового позиционно-силового управления в области экспериментально установленных технологических режимов, в моменты, когда величина наплавки не превышала допустимой глубины резания, коррекция подачи стабилизировала процесс обработки. Также было установлено отсутствие колебаний промышленного робота (рисунок 3.13 в, г).



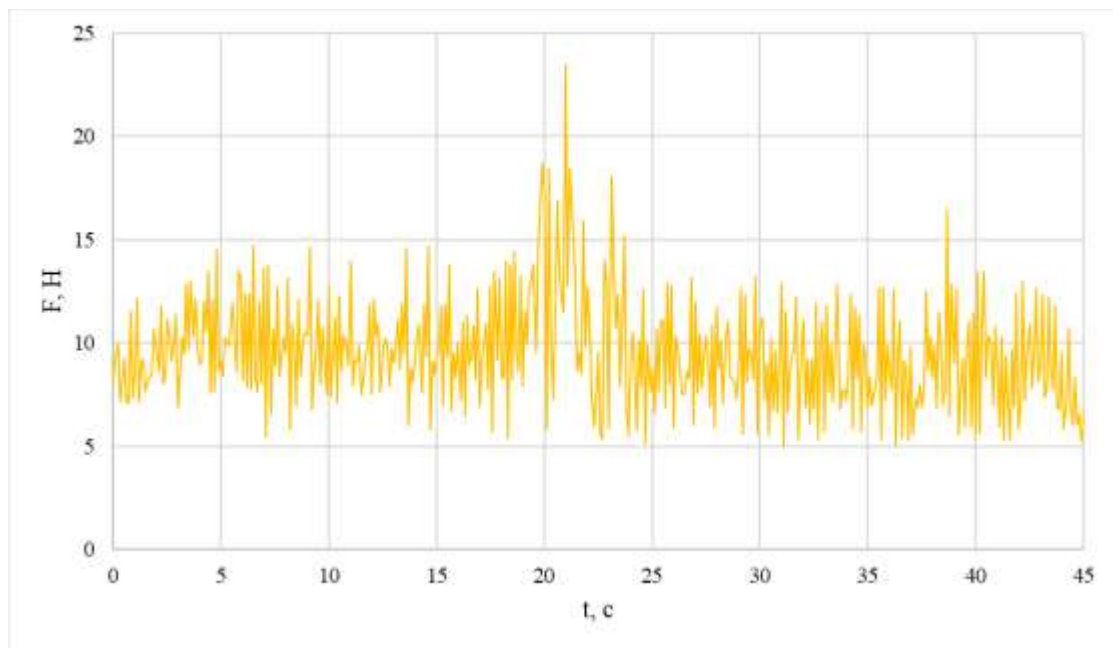
a)



б)



B)



г)

Рисунок 3.13 – Выводы силомоментного датчика при обработке в условиях неравномерного припуска: а, б – при наличии вибраций при обработке; в, г – при стабильном процессе резания

На основе полученных выводов с силомоментного датчика можно утверждать:

1. При превышении допустимого расчетного значения силы резания происходит коррекция подачи инструмента, стабилизируя процесс обработки.
2. Стабильное протекание процесса резания имеет место при прохождении искусственной неровности (наплавки) при использовании разработанного алгоритма и высотах наплавки в диапазоне $0,1 \dots 0,3$ мм.
3. В случае возникновения вибраций инструмента зона колебаний силовых параметров обработки выходит за пределы искусственной неровности (наплавки).

В экспериментах со стабильным процессом обработки установлено что величина силовых факторов достигала порядка 40Н. Результаты предварительных экспериментов будут использованы при планировании эксперимента определения влияния диапазона силовых факторов на величину шероховатости R_a . После обработки были проведены измерения шероховатости обработанной поверхности (рисунок 3.14).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.14 – Профилограмма обработанной поверхности:

а – R_a 2,4 мкм, расстояние 250 мм, вибрации при обработке; б - R_a 1.95 мкм, расстояние 500 мм, вибрации при обработке; в – R_a 0.9 мкм, расстояние 250 мм, стабильный процесс; г - R_a 0.84 мкм, расстояние 500 мм, стабильный процесс

По результатам серии экспериментов проведены измерения обработанных поверхностей (рисунок 3.8). Результаты представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 Результаты обработки криволинейной поверхности в условиях неравномерного припуска

№		Размер X, мм	Размер Y, мм	R_a , мкм
1	1	15,05	59,05	0,85
	2	15,02	58,95	1,09
	3	15	59,01	0,91
2	4	15,1	59,27	1,41
	5	15,12	59,13	1,51
	6	15,29	59,1	1,68
3	7	14,95	59,01	0,95
	8	15	58,95	1,15
	9	15,03	59,04	0,88
4	10	15,25	59,23	1,3
	11	15,13	59,18	1,88
	12	15,08	59,12	1,43

В экспериментах 1 и 3 (таблица 3.7), коррекция подачи стабилизировала процесс резания. В экспериментах 2 и 4 возникали вибрации, инструмент отклонялся от программной траектории, что приводило к увеличению погрешности обработки. На основе технологических требований, допуск на обработку поверхности на аналогичных операциях составляет 0,1...0,2 мм. На основе таблицы

3.7 можно утверждать, что при использовании разработанного алгоритма и отсутствии вибраций обеспечиваются требования по размерной точности. Также установлено, что обеспечивается шероховатость поверхности $R_a 0,8 \dots 1,2$ мкм при стабильном процессе обработки.

Измерения проводились с использованием следующих средств измерений:

1. Микрометр ЧИЗ МК-25.
2. Микрометр ЧИЗ МК-75.
3. Профилометр модели 130 (рисунок 3.15).

Управление профилометром осуществлялось либо в автономном режиме с кнопок и экрана привода, либо с персонального компьютера (ПК).

Функционирование профилометра основано на методе ощупывания, при котором регистрация микрогеометрии исследуемой поверхности осуществляется посредством перемещения щупа индуктивного датчика (алмазной иглы) в процессе трассирования — равномерного поступательного движения датчика вдоль измеряемой поверхности.



Рисунок 3.15 – Профилометр модели 130

Схема конструкции профилометра модели 130 представлена на рисунке 3.16. Измерительный датчик 14 фиксируется хвостовиком в посадочном гнезде штока привода 12, совершающего возвратно-поступательное движение в процессе трассирования. Стопорный винт 13, приводимый в действие шестигранным

ключом из комплекта поставки, обеспечивает надежное закрепление датчика.

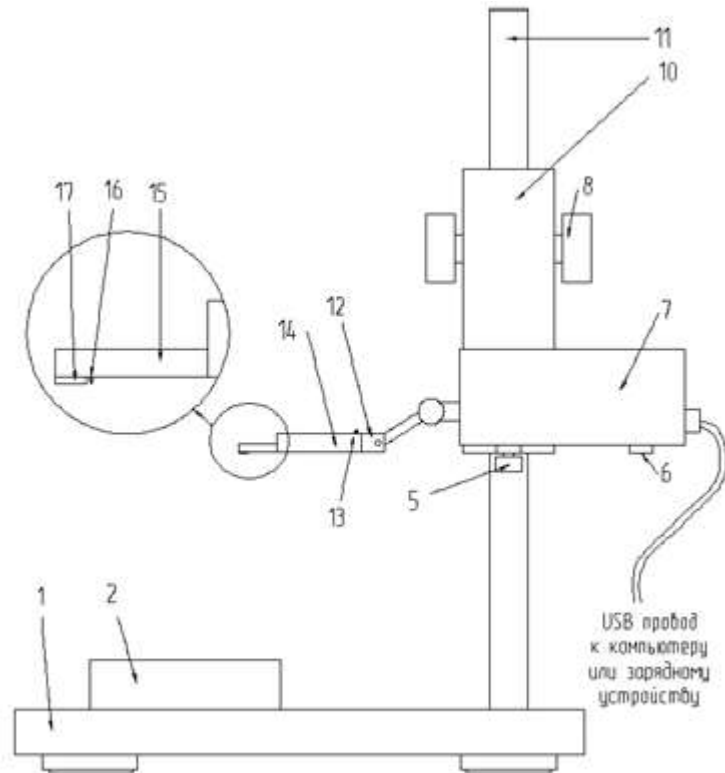


Рисунок 3.16 – Принципиальная схема профилометра модели 130

Привод 7, реализующий механизм трассирования, может быть установлен в двух конфигурациях:

- непосредственно на измеряемую деталь посредством опорных ножек 6;
- на каретке 10 измерительной стойки с фиксацией винтом 5.

Каретка 10 оснащена стопорным винтом, ослабление которого обеспечивает возможность её свободного перемещения по колонне 11 в вертикальном направлении, а также вращения вокруг оси колонны. После фиксации каретки на требуемой высоте предусмотрена возможность плавной вертикальной коррекции ее положения посредством рукояток 8, расположенных симметрично с обеих сторон каретки. При размещении привода на измерительной стойке исследуемая деталь может устанавливаться непосредственно на плиту 1, либо на призму 2. Призма конструктивно обеспечивает возможность линейного перемещения по плите в направлении трассирования, а также может быть уложена на бок для базирования плоских образцов.

Максимальная высота деталей, размещаемых на плите в стандартной конфигурации, составляет 220 мм. Путем поворота привода с датчиком на 180° относительно вертикальной оси обеспечивается возможность измерения деталей, габариты которых превышают указанное ограничение.

В передней части корпуса датчика 14 расположен носик 15, выполненный из нержавеющей стали. В ходе измерений твердосплавная опора датчика скользит по исследуемой поверхности, описывая огибающую профиля по вершинам микронеровностей и обеспечивая стабильное базирование измерительной системы. Алмазная игла, также находящаяся в контакте с поверхностью, совершает вертикальные перемещения, повторяя микрогеометрию профиля, что позволяет регистрировать его параметры с высокой точностью.

3.5 Выводы по главе 3

1. На основе проведенных экспериментов можно утверждать, что применение алгоритма управления и подбор значений режимов резания на чистовом проходе значительно уменьшает величины силовых факторов. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность алгоритма порогового позиционно-силового управления.

2. Применение разработанного алгоритма обеспечивает стабильное протекание процесса резания при прохождении искусственных неровностей (наплавов) высотой до 0.3 мм.

3. Экспериментально установлено, что в случае стабильного процесса резания и отсутствия колебаний оборудования величина силовых факторов в зоне резания не превышала 40Н. Полученная информация необходима для планирования эксперимента и выбора допустимых интервалов силовых факторов.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

4.1 Определение варьируемых факторов, выбор вида модели

Экспериментальные исследования проводились с целью определения влияния технологических режимов обработки и границ допустимых силовых факторов на величину среднеарифметической шероховатости поверхности (параметр R_a) при обработке с использованием алгоритма порогового силового управления. В качестве объекта исследований были выбраны образцы из алюминиевого сплава марки Д16Т, широко применяемого в авиастроении благодаря высоким прочностным характеристикам.

Реализация эксперимента предусматривала варьирование следующих входных технологических параметров и силовых факторов (таблица 4.1):

- частота вращения инструмента V , об/мин;
- глубина резания t , мм;
- максимальное усилие $F_{\max}$, Н;
- минимальное усилие $F_{\min}$, Н.

Обработка образцов осуществлялась твердосплавной концевой фрезой. Подача инструмента находилась в диапазоне 60...120 мм/мин. Пара максимальной и минимальной силы формируют допустимый диапазон для каждого опыта. На основании величин силовых факторов принималось решение по уменьшению или увеличению величины подачи.

Таблица 4.1 – Входные параметры (факторы)

Факторы	Обозначения
Скорость вращения инструмента, об/мин	X_1
Глубина резания, мм	X_2
Максимальное усилие, Н	X_3
Минимальное усилие, Н	X_4

Применение методов планирования эксперимента (ПЭ) позволяет получить зависимости, описывающие изменение шероховатости поверхности как функции технологических параметров обработки [6, 7]. В рамках проводимого исследования шероховатость поверхности рассматривалась в качестве целевой функции (функции отклика).

Построение математического описания исследуемого процесса осуществлялось на основе статистического плана эксперимента. Аппроксимация функции отклика выполнялась с использованием степенных зависимостей, обеспечивающих достаточную точность описания при относительно небольшом количестве оцениваемых коэффициентов. В рассматриваемых интервалах величин факторов функция шероховатости может быть представлена:

$$R_a = cX_1^\alpha X_2^\beta X_3^\gamma X_4^\theta \quad (4.1)$$

где $c, \alpha, \beta, \gamma, \theta$ – константы.

После логарифмирования уравнение (4.1) принимает вид:

$$\ln R_a = \ln c + \alpha \ln X_1 + \beta \ln X_2 + \gamma \ln X_3 + \theta \ln X_4 \quad (4.2)$$

Возможность аппроксимации уравнения (4.2) устанавливалась применением полинома (4.3) с целью проверки адекватности линейной модели. Уравнение регрессии с полиномом первой степени имеет вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 \quad (4.3)$$

где x_i кодированные значения параметров X_i ;

Кодирование значения параметров x_i по выражению:

$$x_i = 2 \frac{\ln X_i - \ln X_{\max}}{\ln X_{\max} - \ln X_{\min}} + 1 \quad (4.4)$$

где $X_i, X_{\max}$ и $X_{\min}$ – значения параметров на основном, верхнем и нижнем уровнях в физических единицах; i – номер параметра.

На основе пробных экспериментов были выбраны следующие уровни параметров (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Уровни значений параметров при механической обработке с использованием порогового силового управления

Параметр	Уровень			Интервал варьирования	Размерность
	-1	0	+1		
X_1	6000	7500	9000	1500	об/мин
X_2	50	150	250	0,1	мм
X_3	20	30	40	10	Н
X_4	5	7,5	10	2,5	Н

Число опытов в случае выполнения полно-факторного планирования эксперимента $2^4 = 16$ опытов (таблицы 4.3). Для каждого из наборов было выполнено по 3 повторных опыта.

Таблица 4.3 – Матрица планирования эксперимента

№		X_1	X_2	X_3	X_4	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y_i
1	24	6000	0,1	20	5	+1	-1	-1	-1	-1	y_1
	7										
	41										
2	15	9000	0,1	20	5	+1	+1	-1	-1	-1	y_2
	33										
	2										
3	48	6000	0,3	20	5	+1	-1	+1	-1	-1	y_3
	19										
	9										
4	31	9000	0,3	20	5	+1	+1	+1	-1	-1	y_4
	45										
	11										
5	27	6000	0,1	40	5	+1	-1	-1	+1	-1	y_5
	36										
	5										
6	39	9000	0,1	40	5	+1	+1	-1	+1	-1	y_6
	13										

	44										
7	22	6000	0,3	40	5	+1	-1	+1	+1	-1	y_7
	29										
	1										
8	48	9000	0,3	40	5	+1	+1	+1	+1	-1	y_1
	18										
	8										
9	38	6000	0,1	20	10	+1	-1	-1	-1	+1	y_2
	42										
	25										
10	14	9000	0,1	20	10	+1	+1	-1	-1	+1	y_3
	46										
	3										
11	35	6000	0,3	20	10	+1	-1	+1	-1	+1	y_4
	20										
	40										
12	6	9000	0,3	20	10	+1	+1	+1	-1	+1	y_5
	32										
	17										
13	43	6000	0,1	40	10	+1	-1	-1	+1	+1	y_6
	28										
	12										
14	37	9000	0,1	40	10	+1	+1	-1	+1	+1	y_7
	21										
	10										
15	30	6000	0,3	40	10	+1	-1	+1	+1	+1	y_8
	26										
	4										
16	23	9000	0,3	40	10	+1	+1	+1	+1	+1	y_8
	34										
	16										

4.2 Обработка результатов эксперимента

В результате каждого опыта, соответствующего определенной строке матрицы планирования, были получены частные значения целевой функции (параметра шероховатости R_a). Значения приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты эксперимента

№		X_1 , [об/мин]	X_2 , [мм]	X_3 , [Н]	X_4 , [Н]	R_a , [мкм]	$\ln R_a$
1	24	6000	0,1	20	5	0.9	-0.105
	7					1.08	0.077
	41					0.94	-0.062
2	15	9000	0,1	20	5	0.85	-0.163
	33					0.81	-0.211
	2					0.96	-0.041
3	48	6000	0,3	20	5	1.35	0.300
	19					1.21	0.191
	9					1.12	0.113
4	31	9000	0,3	20	5	1.1	0.095
	45					1.15	0.140
	11					1.03	0.030
5	27	6000	0,1	40	5	1.26	0.231
	36					1.15	0.140
	5					1.34	0.293
6	39	9000	0,1	40	5	1.02	0.020
	13					0.95	-0.051
	44					1.05	0.049
7	22	6000	0,3	40	5	1.62	0.482
	29					1.42	0.351
	1					1.33	0.285
8	48	9000	0,3	40	5	1.23	0.207

	18					1.47	0.385
	8					1.56	0.445
9	38	6000	0,1	20	10	0.97	-0.030
	42					1.23	0.207
	25					1.05	0.049
10	14	9000	0,1	20	10	0.92	-0.083
	46					0.89	-0.117
	3					0.99	-0.010
11	35	6000	0,3	20	10	1.14	0.131
	20					1.41	0.344
	40					1.32	0.278
12	6	9000	0,3	20	10	1.18	0.166
	32					1.08	0.077
	17					1.24	0.215
13	43	6000	0,1	40	10	1.1	0.095
	28					1.23	0.207
	12					0.99	-0.010
14	37	9000	0,1	40	10	1.02	0.020
	21					1.21	0.191
	10					1.37	0.315
15	30	6000	0,3	40	10	1.84	0.610
	26					2.03	0.708
	4					1.46	0.378
16	23	9000	0,3	40	10	1.62	0.482
	34					1.48	0.392
	16					1.23	0.207

Поскольку единичное наблюдение не позволяет утверждать о воспроизводимости процесса и содержит случайную составляющую погрешности, для каждой j -й строки матрицы планирования проводилась серия повторных

ОПЫТОВ:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_{ju} \quad (4.5)$$

где n – номер опыта; y_{ju} – значение рационального параметра в u - повторном опыте j -й строки матрицы. Для оценки отклонения параметра от средних значений, определялась дисперсия по каждому опыту:

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2 \quad (4.6)$$

Достоверность полученных экспериментальных данных обеспечивалась применением методов статистического анализа, включающих оценку погрешности измерений и проверку однородности выборки. Мерой случайной погрешности эксперимента служило среднеквадратическое отклонение, определяемое как корень квадратный из выборочной дисперсии. Данный показатель характеризует абсолютную величину разброса результатов относительно среднего значения и позволяет судить о воспроизводимости опытов.

При проведении экспериментальных исследований всегда присутствуют неконтролируемые факторы, влияние которых не может быть полностью исключено или учтено в явном виде. Степень влияния этих неучтенных факторов непосредственно определяет величину рассеяния экспериментальных данных: чем выше их вклад, тем значительнее может быть отклонение отдельных результатов от основной совокупности. Наличие таких отклонений (выбросов) искажает статистические характеристики выборки и может привести к некорректным выводам. Для идентификации и последующего исключения грубых погрешностей измерений применялся критерий U , регламентированный ГОСТ 11.002-73. Расчетная процедура заключалась в определении отношения U , значение которого сравнивалось с критическими табличными значениями для заданного уровня значимости. На основе этого сравнения принималось решение о том, принадлежат ли экстремальные результаты, полученные в экспериментах, к нормальному (Гауссову) распределению или являются статистически аномальными [6]. В первом случае результаты сохранялись в выборке как допустимые, во втором —

исключались как выбросы, не характерные для исследуемого процесса:

$$U_1 = \frac{y_{jmax} - \bar{y}_j}{s_j} \text{ или } U_2 = \frac{\bar{y}_j - y_{jmin}}{s_j} \quad (4.7)$$

где y_{jmax} и y_{jmin} – наибольшее и наименьшее значение рационального параметра в повторных опытах.

При уровне значимости в 5% и для числа повторных опытов $n = 3$ граничное значение составило $\beta = 1,15$ (ГОСТ 11.002-73). Решение об отбраковке сомнительного результата принималось на основе сравнения расчетного значения U с критическим β . Условие исключения результата из выборки формулировалось следующим образом: если $U \geq \beta$, проверяемое значение классифицируется как аномальное (не принадлежащее нормальной совокупности) и подлежит исключению. При выполнении условия $U < \beta$, результат признается статистически однородным с остальными наблюдениями и сохраняется в выборке.

Итоговые значения расчетных критериев представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты значения U при обработке

№ опыта	$U < \beta = 1,15$	
	R_a	
	U_1	U_2
1	1.12	0.79
2	1.11	0.83
3	1.05	0.94
4	0.93	1.06
5	0.93	1.06
6	0.84	1.11
7	1.09	0.87
8	0.80	1.12
9	1.09	0.87

10	1.10	0.85
11	0.85	1.10
12	0.89	1.08
13	1.01	0.99
14	0.94	1.05
15	0.84	1.10
16	0.87	1.09

Полученные результаты экспериментов, дисперсии шероховатости представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты экспериментов и дисперсии шероховатости

№ опыта	R _a	
	$\bar{y}_j$	S_j^2
1	-0.030	0.009
2	-0.138	0.008
3	0.201	0.009
4	0.088	0.003
5	0.221	0.006
6	0.006	0.003
7	0.373	0.010
8	0.346	0.015
9	0.075	0.015
10	-0.070	0.003
11	0.251	0.012
12	0.153	0.005
13	0.097	0.012

14	0.175	0.022
15	0.565	0.029
16	0.360	0.020

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований включала проверку однородности дисперсий, необходимую для обоснования правомерности последующего усреднения данных. Проверка осуществлялась с использованием F-критерия Фишера, который представляет собой отношение большей дисперсии к меньшей [6]:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (4.8)$$

где S_1^2 и S_2^2 – максимальная и минимальная величина дисперсии в различных опытах.

Дисперсии являются однородными, если $F < F_m$ (таблица 4.7). При принятом числе степеней свободы $f_1 = n_{max} - 1 = 2$, $f_2 = n_{min} - 1 = 2$ и уровне значимости в 5% принимаем $F_m = 19,2$ [6].

Таблица 4.7 – Проверка однородности дисперсий по F-критерию Фишера

Величина F	$F < F_m = 19,2$
10.8	да

По критерию Кохрена была проверена однородность ряда:

$$G = \frac{S_{max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} \quad (4.9)$$

В настоящем исследовании для определения критического значения G_m использовались следующие параметры:

- количество сравниваемых дисперсий: $N = 8$;
- количество повторных опытов в каждой серии: $n = 3$;
- уровень значимости принимался равным 5% ($\alpha = 0,05$).

При указанных параметрах табличное значение критерия Кохрена составляет $G_m = 0,3346$ [6].

В случае, если расчетное значение G превышало критическое ($G > G_m$), гипотеза об однородности дисперсий отвергалась. Результаты проверки по критерию Кохрена для анализируемых серий опытов и выводы о принятии, либо отклонении гипотезы однородности представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Проверка однородности дисперсий по критерию Кохрена

Величина G	$G < G_m = 0,3346$
0.16	да

4.3 Определение коэффициентов регрессии

По результатам экспериментальных исследований проводилось определение коэффициентов уравнения регрессии методом наименьших квадратов в матричной форме [6]:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T \bar{Y}, \quad (4.10)$$

где B — вектор-столбец искомых коэффициентов регрессии; X — матрица значений факторов в кодированном виде (матрица плана эксперимента); X^T — транспонированная матрица X ; $(X^T X)^{-1}$ — обратная матрица к матрице нормальных уравнений; $\bar{Y}$ — вектор-столбец средних значений отклика, полученных усреднением результатов повторных опытов для каждой строки плана.

Значения коэффициентов уравнений регрессии приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Значимость коэффициентов уравнений регрессии

b_i	R_a
b_0	0.167
b_1	-0.052
b_2	0.125
b_3	0.101
b_4	0.334

После получения численных значений коэффициентов уравнения регрессии была выполнена процедура проверки их статистической значимости. Для этой цели

использовался t-критерий Стьюдента, позволяющий оценить отношение величины коэффициента к его стандартной ошибке. Для этого необходимо сравнить полученные значения с табличными [6]:

$$t_j = \frac{|b_j|}{S_{\{b\}}} \quad (4.11)$$

где b_j — значение j -го коэффициента регрессии; S_b — средняя квадратическая ошибка (стандартное отклонение) коэффициентов регрессии.

Дисперсия коэффициентов регрессии вычислялась по выражению (4.12) [9]:

$$S_{\{b\}}^2 = \frac{S_y^2}{nN} \quad (4.12)$$

Если дисперсии опытов s_j^2 однородны, то дисперсии S_y^2 воспроизводимости опыта определяются по формуле [39]:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_j^2 \quad (4.13)$$

Коэффициент значим, если $t_j > t_j^{крит}$. Для принятого уровня значимости в 5% и числа степеней свободы $f = (n-1)N = (3-1)16 = 32$, принимаем $t_j^{крит} = 2,04$ [6].

Результаты проверки значимости всех коэффициентов регрессионной модели и выводы о значимости представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Значимость коэффициентов после проверки

b_i		s_{b}	t_j	Сравнение	Значимость
b ₀	0.167	0.0153	10.95	$t_j > t_j^{крит}$	+
b ₁	-0.052		3.41	$t_j > t_j^{крит}$	+
b ₂	0.125		8.19	$t_j > t_j^{крит}$	+
b ₃	0.101		6.61	$t_j > t_j^{крит}$	+
b ₄	0.334		2.21	$t_j > t_j^{крит}$	+

Для рассматриваемых функций отклика R_a уравнения регрессии можно записать на основе данных, приведенных в таблице 4.11.

Тогда уравнения регрессии имеют вид:

$$y_{Ra} = 0.167 - 0.052x_1 + 0.125x_2 + 0.101x_3 + 0.334x_4 \quad (4.14)$$

4.4 Проверка адекватности модели

Для этой цели применялся анализ остаточной дисперсии (дисперсии адекватности) с последующей проверкой по F-критерию Фишера.

Дисперсия адекватности $S_{ад}^2$ (остаточная дисперсия) характеризует расхождение между значениями отклика, предсказанными регрессионной моделью и экспериментально полученными средними значениями. Её вычисление проводилось по формуле:

$$S_{ад}^2 = \frac{n \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_i)^2}{N - (k + 1)} \quad (4.15)$$

где $\hat{y}_i$ – значение рационального параметра, вычисленное по модели для условий j-го опыта; k – число параметров. По F-критерию Фишера были проверены гипотезы адекватности найденной модели [6]:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} \quad (4.16)$$

При принятом количестве степеней свободы $f_1 = N - (k + 1) = 16 - (4 + 1) = 11$, $f_2 = N(n-1) = 16(3-1) = 32$ и уровне значимости 5%, принимаем $F_m = 2,1$.

Для упорядочения промежуточных вычислений и обеспечения наглядности результатов все необходимые расчетные данные, включая экспериментальные и модельные значения отклика, а также их разности, были сведены в таблицу 4.11.

Таблица 4.11 – Вспомогательная таблица для расчета дисперсии адекватности

№	$\bar{y}_j$	$(\bar{y}_j - y_i)^2$
1	-0.041	0.000115
2	-0.139	0.000002
3	0.207	0.000032

4	0.104	0.000261
5	0.166	0.003099
6	0.058	0.002757
7	0.412	0.001549
8	0.307	0.001457
9	0.030	0.002075
10	-0.073	0.000007
11	0.278	0.000723
12	0.174	0.000459
13	0.231	0.017872
14	0.122	0.002794
15	0.476	0.007953
16	0.372	0.000123

Анализ полученных результатов, систематизированных в таблице 4.12, позволяет заключить, что расчетное значение F-критерия удовлетворяет условию $F \leq F_{\text{крит}}$. Следовательно, гипотеза об адекватности уравнения регрессии (4.1) подтверждается на принятом уровне значимости. Это означает, что построенная модель с достаточной точностью описывает исследуемый процесс в пределах варьирования факторов.

Таким образом, при выборе рациональных технологических режимов обработки, зависимость параметра шероховатости от исследуемых факторов может быть представлена уравнением (4.1), адекватность которого экспериментально подтверждена.

Таблица 4.12 – Результаты проверки адекватности модели

	R_a
$S_{\text{ад}}^2$	0.0113
S_y^2	0.0112
F	1,01
$F < F_m$	Да

4.5 Исследование влияния варьируемых параметров на величину шероховатости

Для перехода к натуральным значениям параметров в уравнение регрессии подставлялись значения параметров x_1 , x_2 , x_3 , x_4 по формуле (4.4). После преобразования получили:

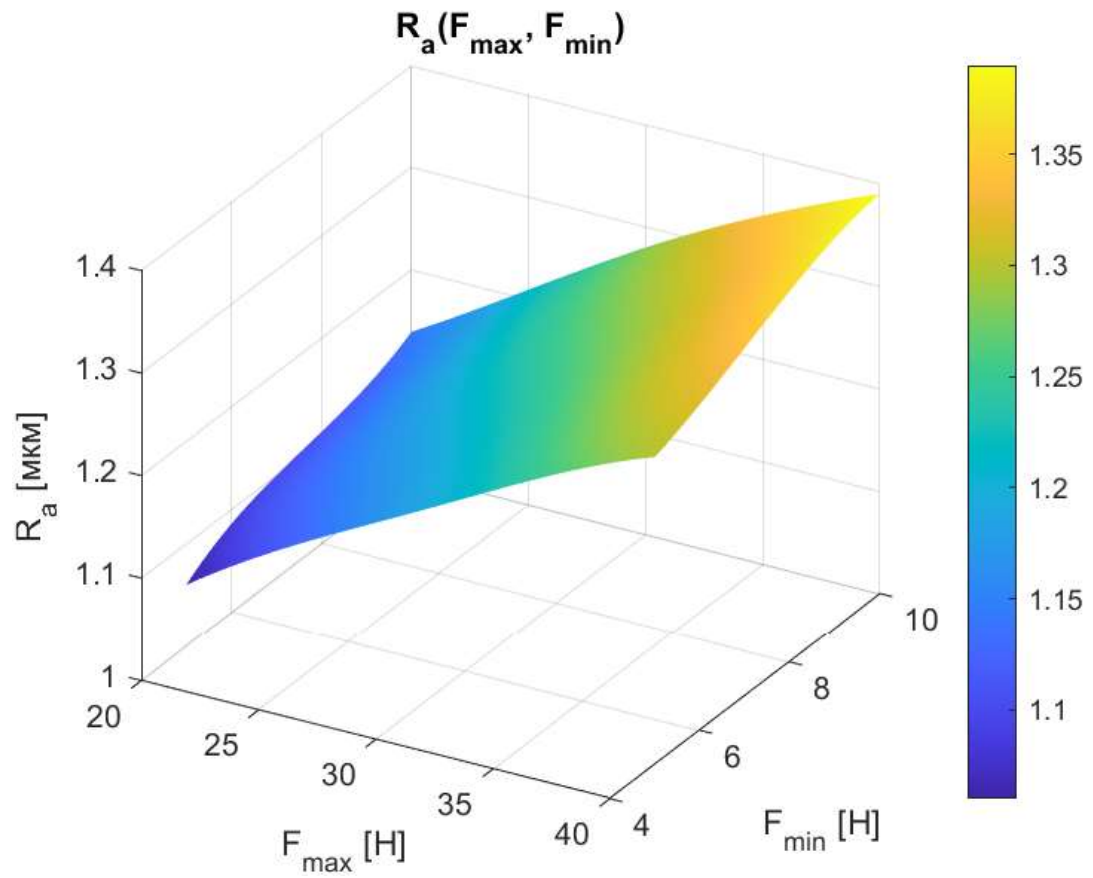
$$\ln R_a = 5.43 - 0.26 \ln X_1 + 0.23 \ln X_2 + 0.29 \ln X_3 + 0.1 \ln X_4 \quad (4.19)$$

Преобразуя зависимость (4.19), получим зависимость шероховатости R_a от технологических режимов:

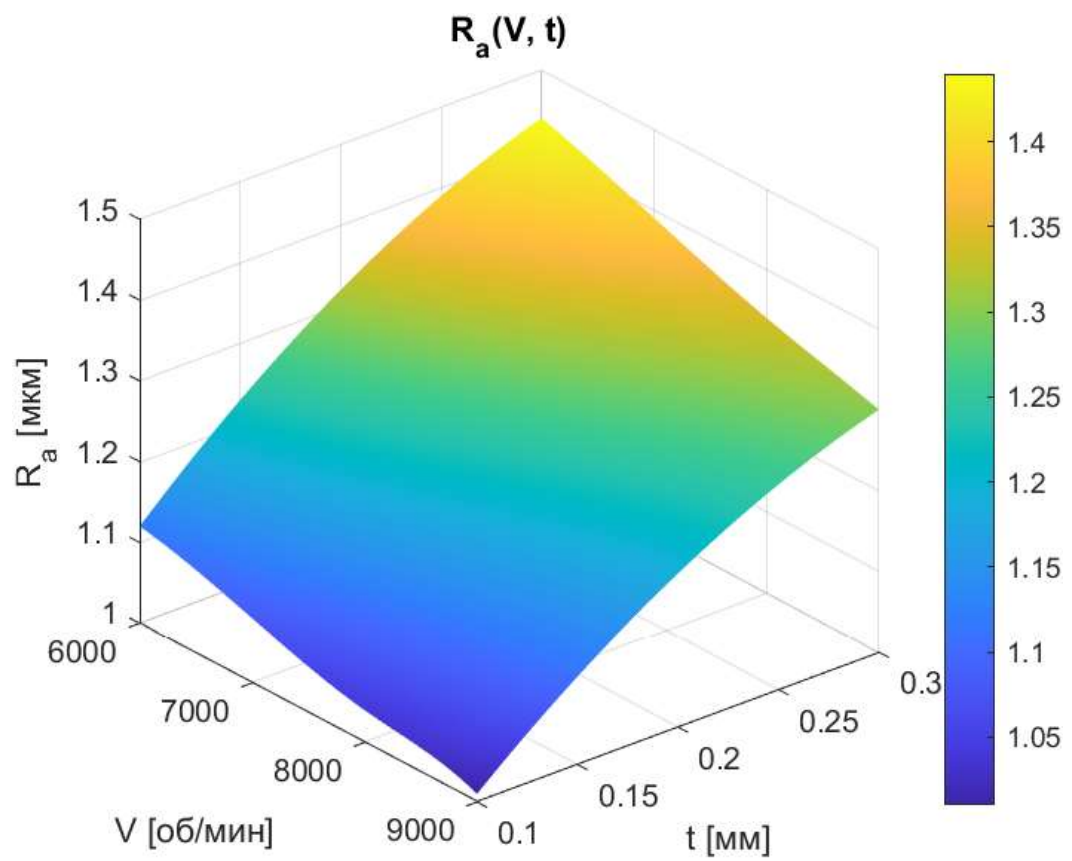
$$R_a = 5.43 V^{-0.26} t^{0.23} F_{max}^{0.29} F_{min}^{0.1} \quad (4.20)$$

На основе полученного уравнения регрессии (4.1), адекватно описывающего зависимость параметра шероховатости поверхности R_a от исследуемых технологических факторов, были построены номограммы (рисунок 4.1). Данный способ представления результатов позволяет наглядно оценить характер и степень влияния каждого из факторов на выходной параметр, а также выявить области рациональных режимов обработки.

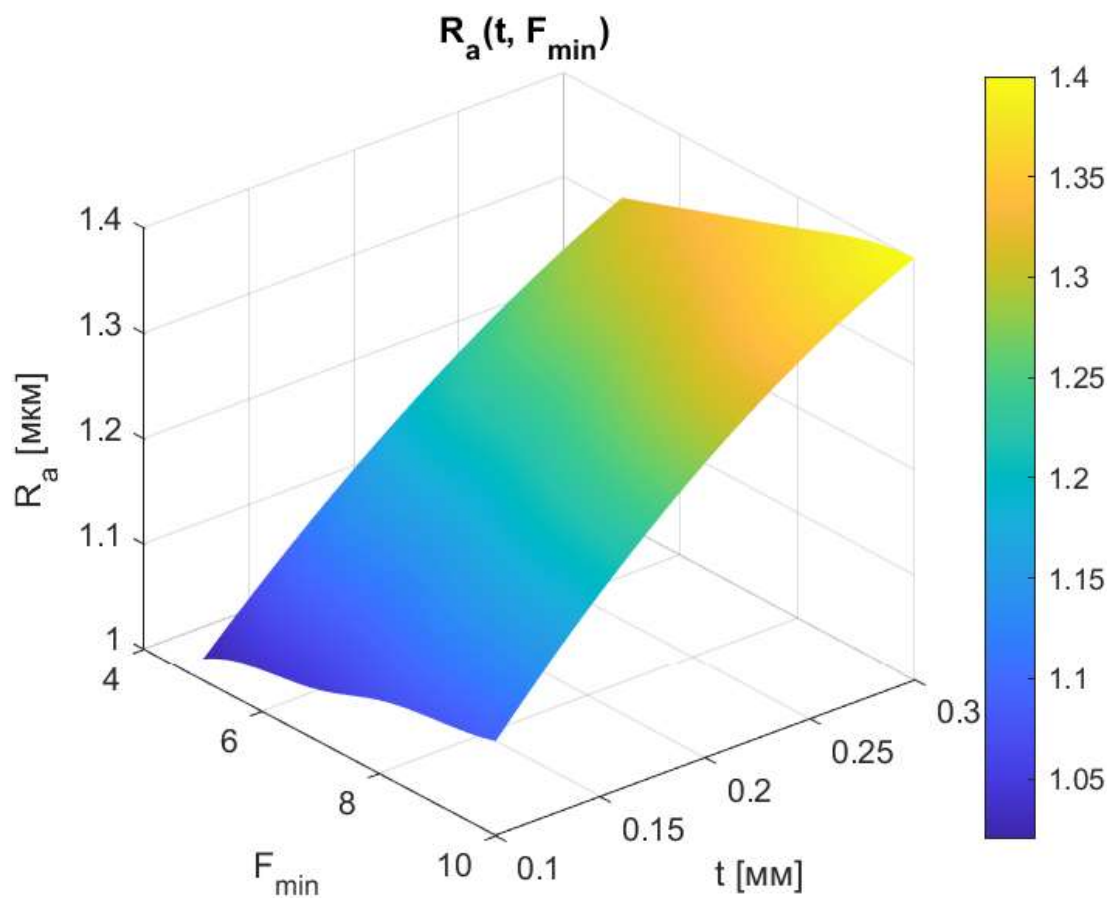
При построении номограмм использовался метод парных комбинаций факторов, при этом другие факторы фиксировались на постоянном уровне. Выявленные зависимости имеют важное практическое значение, поскольку позволяют целенаправленно управлять параметром шероховатости путем соответствующего выбора технологических режимов и допустимых силовых факторов. В частности, для минимизации R_a следует стремиться к работе с минимально возможными (технологически допустимыми) значениями глубины резания и подачи, а также к использованию повышенных скоростей резания в пределах, ограниченных стойкостью инструмента и возможностями оборудования. Увеличение допустимых силовых факторов прямопропорционально влияет на увеличение шероховатости. На основе проведенного эксперимента установлена значимость как верхней, так и нижней границы допустимого интервала величины силовых факторов.



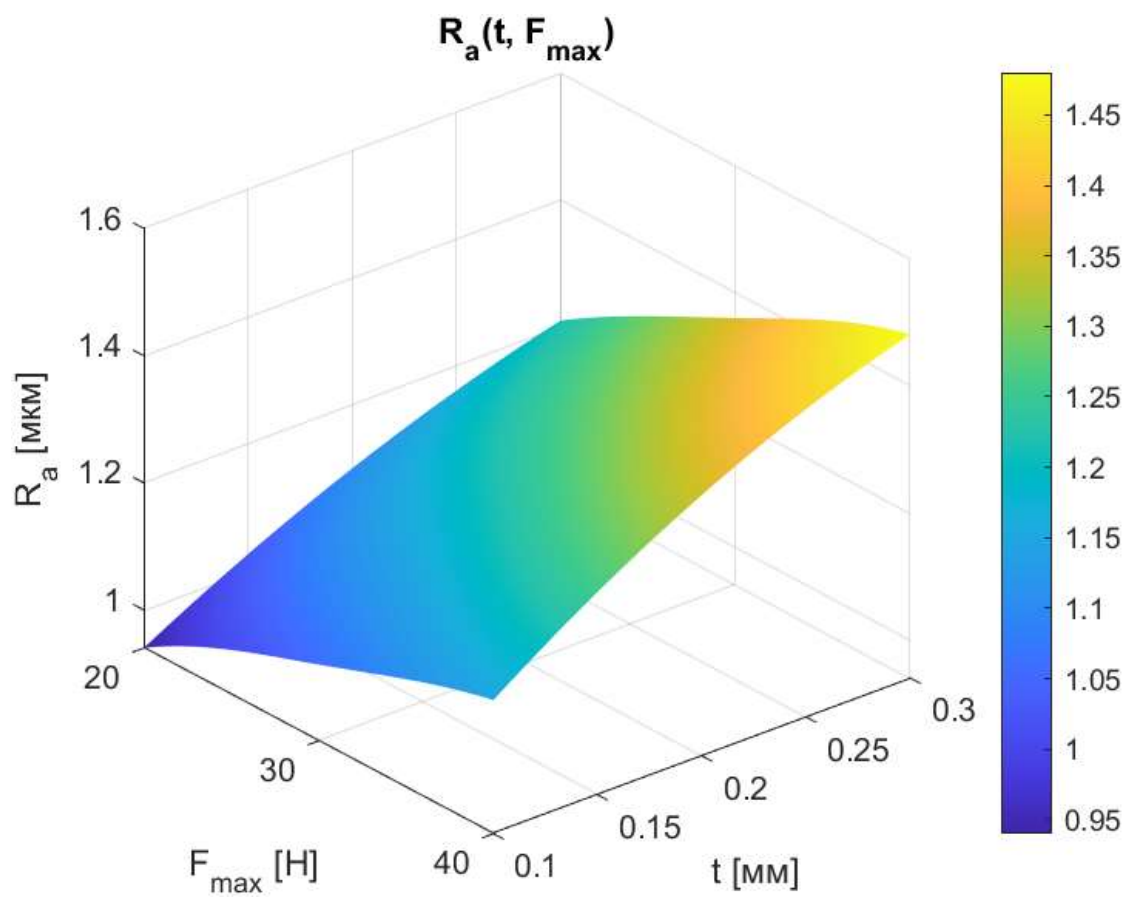
a)



б)

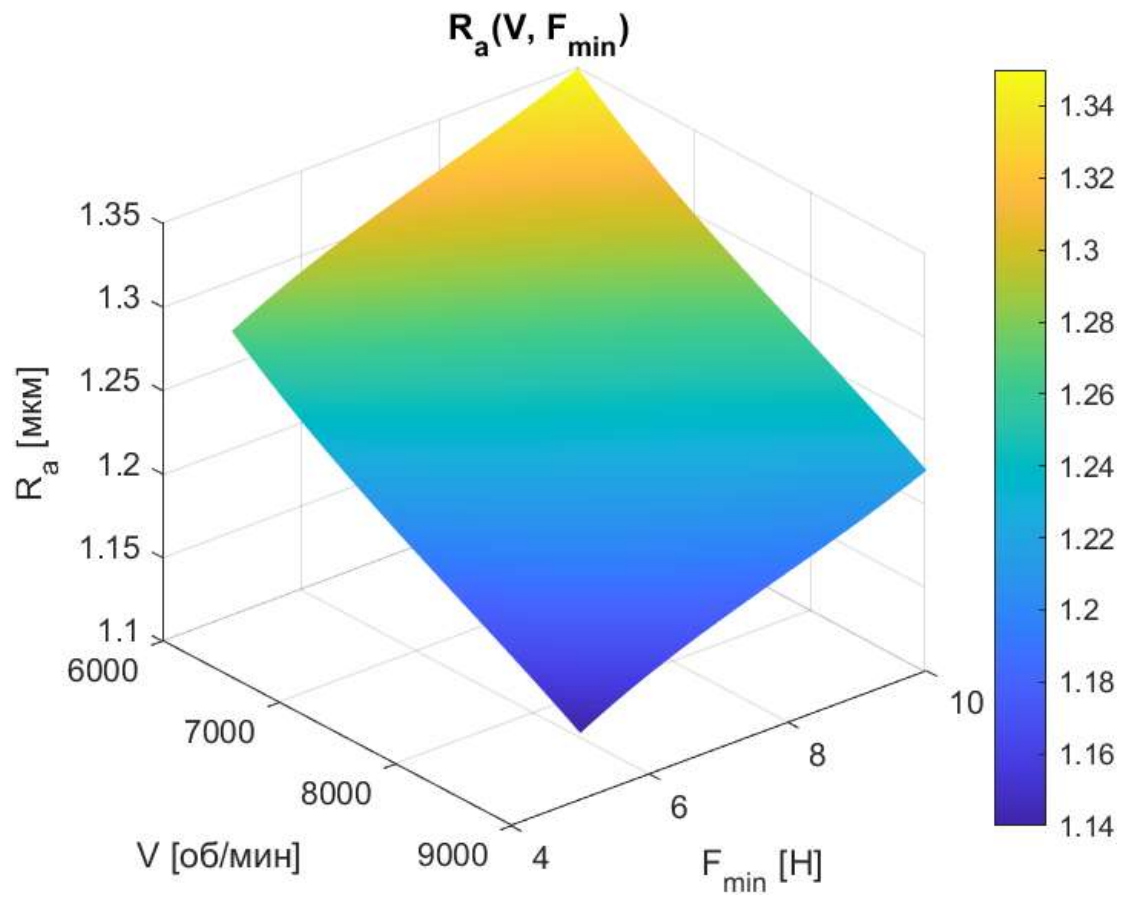


B)

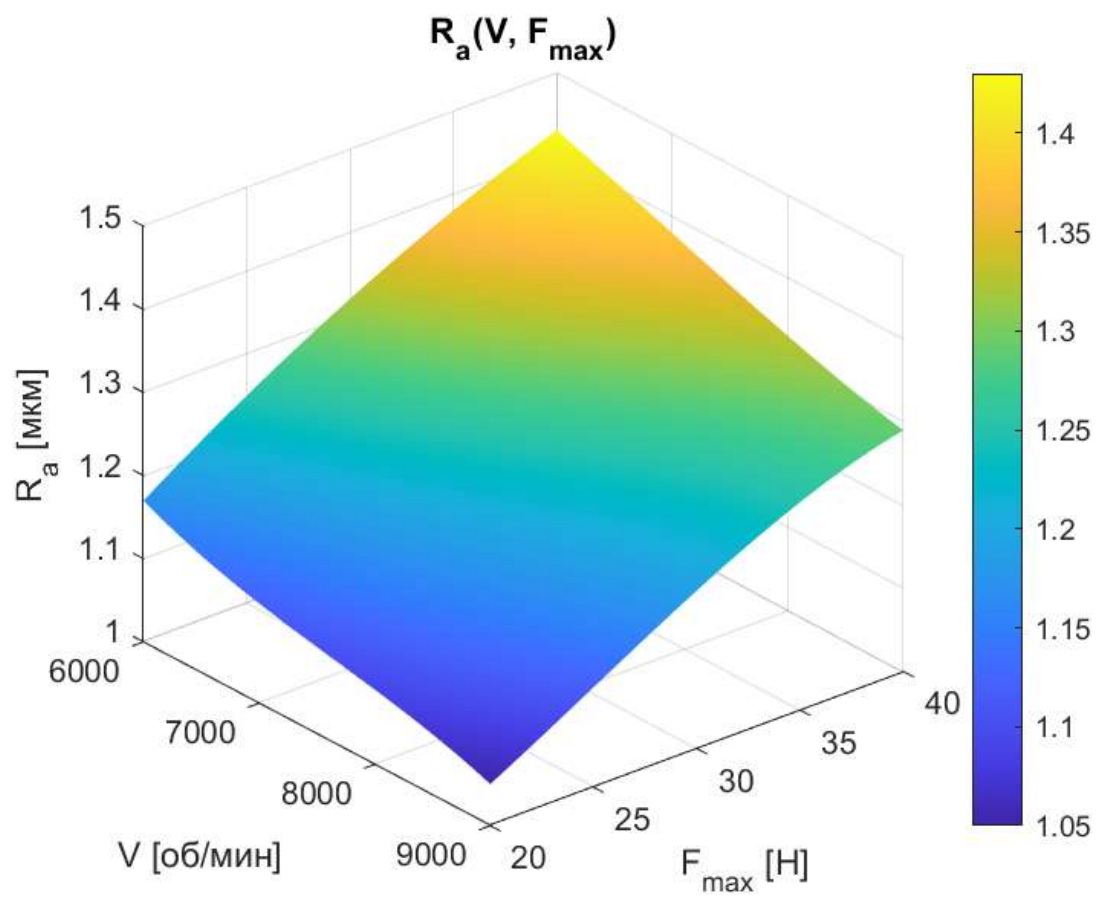


Г)

103



д)



е)

Рисунок 4.1 – Зависимость параметра шероховатости R_a от парных параметров при поддержании остальных параметров на основном уровне: а) от максимальной и минимальной силы; б) от скорости вращения инструмента и глубины резания; в) от глубины резания и минимальной силы; г) от глубины резания и максимальной силы; д) от скорости вращения инструмента и минимальной силы; е) от скорости вращения инструмента и максимальной силы

4.6 Апробация алгоритма на промышленной детали

Изготовление лопаток ГТД имеет ряд нерешенных задач, а именно обработка кромок бандажной, замковой части, радиусы скругления у оснований пера. Данные операции выполняются в настоящее время вручную слесарями узкой специализации и высокой квалификации. Многие из рабочих специализируются на обработке только одного или двух типов лопаток. Это создаёт сложности в организации производства и вынуждает значительно расширять штат сотрудников.

Кроме того, данные работники подвергаются возможности получения профессиональных заболеваний верхних дыхательных путей. Наличие ручных операций не гарантирует стабильного обеспечения качества обработки. При этом переобучение работника на новый вид лопатки может занимать до полугода. Также при анализе технологической документации было отмечено, что в технологическом процессе присутствуют случайные ручные операции.

Например, на рисунке 4.2 можно показан эскиз обработки бандажной части лопатки, выполняемый вручную, а операция является случайной. Обработка производится на слесарном столе при использовании прямой шлифовальной машины и твердосплавной фрезы. Количество подобных ручных операций в одном технологическом процессе может достигать нескольких десятков.

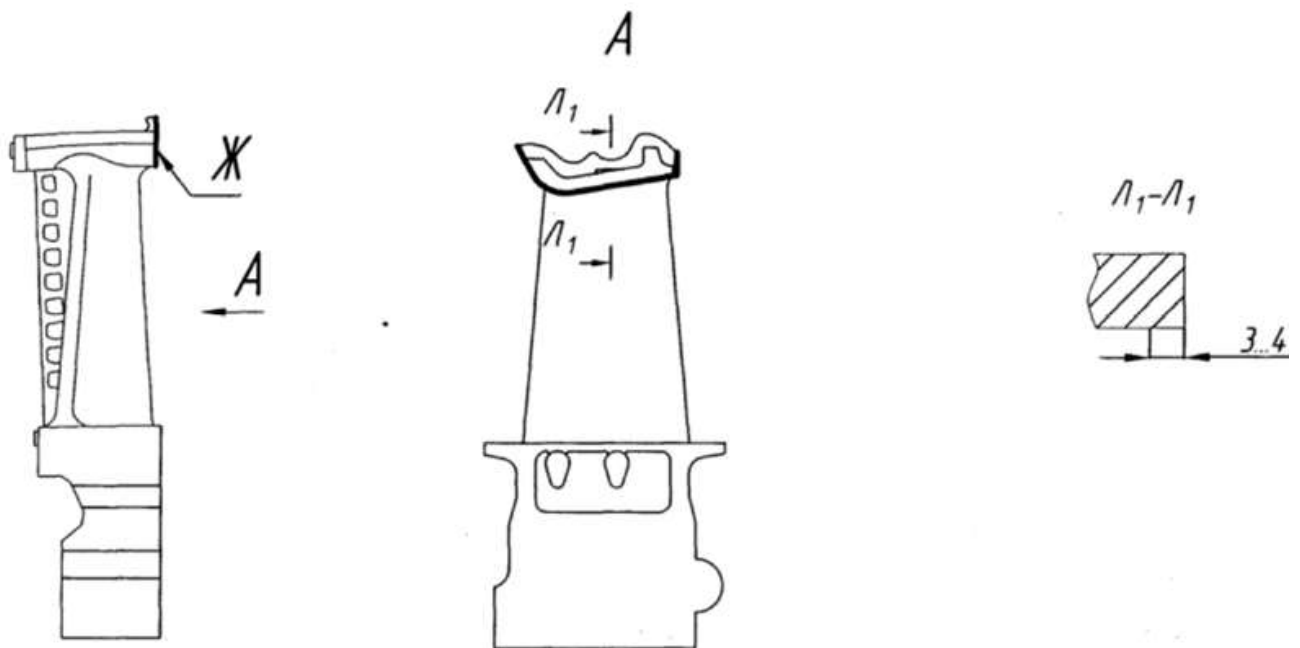
Эскиз №1

Рисунок 4.2 – Случайная операция отделочной обработки

Наличие случайных операций значительно усложняет технологический процесс производства лопаток. Роботизация подобных операций позволит обеспечить технологическую надежность процесса.

Для апробации функционирования алгоритма были выбраны лопатки компрессора ГТД (материал - сплав ВТ-8) (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 – Лопатка компрессора ГТД

Для закрепления в приспособлении на круглых хвостовиках были подготовлены лыски. Привязка перед обработкой проводилась непосредственно

после закрепления в приспособлении (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Лопатка после обработки

Так как обрабатываемость сплава ВТ8 значительно хуже Д16Т, то любые неровности на обрабатываемой поверхности значительно увеличивают значения силовых параметров в зоне резания. Однако разработанный алгоритм позволяет идентифицировать увеличение съема и скорректировать подачу инструмента (рисунок 4.5).

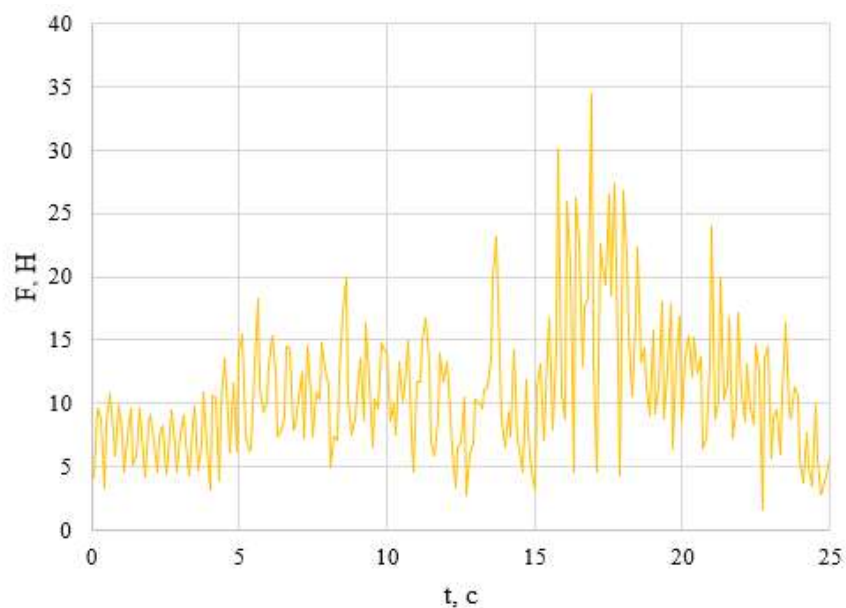


Рисунок 4.5 – Выводы силомоментного датчика при обработке лопатки

Обрабатываемость титана значительно хуже сплава Д16Т. Как видно на выводах СМД даже незначительное изменение глубины резания увеличивает силовые параметры в зоне резания. Обработку в подобных случаях рекомендуется выполнять за несколько проходов. В ходе экспериментов удалось достичь шероховатости R_a в диапазоне 0,8...1,2 мкм. Данный диапазон соответствует требованиям к шероховатости поверхности на подобных операциях (рисунок 4.6).

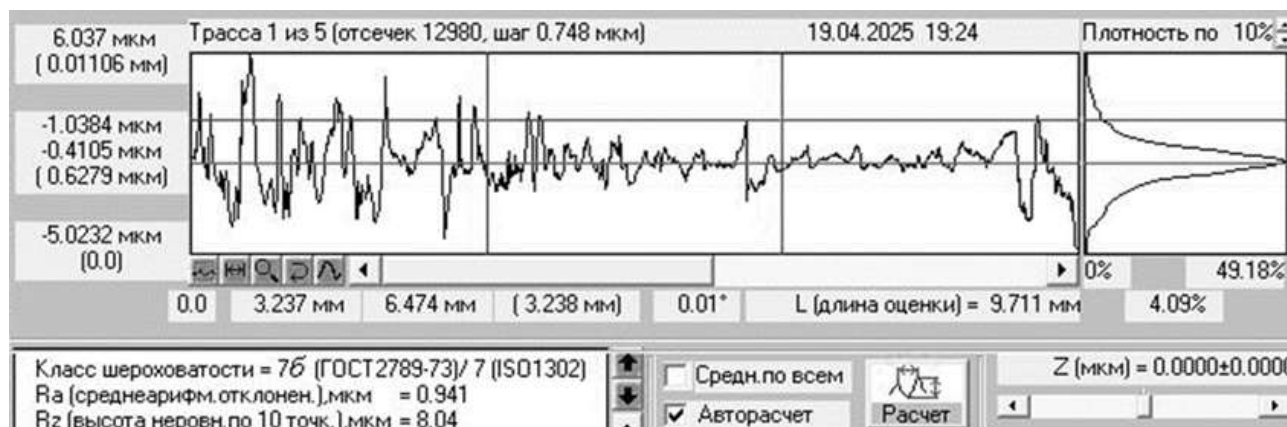


Рисунок 4.6 – Профилограмма обработанной поверхности лопатки компрессора

4.7 Выводы по главе 4

1. В результате проведения экспериментальных исследований подтверждено статистически значимое влияние варьируемых технологических параметров (частоты вращения инструмента, скорости подачи, максимальной и минимальной допустимой силы) на формирование микрогеометрии поверхности при роботизированной механической обработке. Установлена зависимость, описывающая характер изменения шероховатости поверхности.

2. Полученная регрессионная модель и экспериментальные зависимости обеспечивают возможность прогнозирования величины шероховатости поверхности при заданных технологических режимах обработки. Данные зависимости могут быть рекомендованы для практического применения при назначении режимов резания на операциях роботизированной механической обработки.

3. Экспериментально установлен характер влияния исследуемых параметров на шероховатость. Величина шероховатости прямо пропорциональна подаче, глубине резания и величинам допустимых сил и обратно пропорциональна частоте вращения инструмента. Выявленные закономерности согласуются с известными положениями теории резания материалов.

4. Результаты экспериментальной апробации разработанного алгоритмического и программного обеспечения подтвердили его эффективность в условиях обработки криволинейных поверхностей с неравномерным припуском промышленных деталей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенного исследования, значимого для предприятий машино- и приборостроения, решены научные и технические задачи, связанные с обеспечением технологической надежности роботизированной механической обработки криволинейных поверхностей.

2. Разработана методика проектирования технологической операции роботизированной обработки на основе учета одноканальной жесткости технологической системы, а также определены значения фактической жесткости манипулятора при различных вылетах выходного звена. Полученные результаты необходимы для разработки алгоритма порогового позиционно-силового управления и обеспечивают возможность управления процессом обработки.

3. Доказана адекватность и эффективность применения алгоритма порогового управления с коррекцией подачи при роботизированной обработке.

4. Доказано снижение сил резания до 50% по сравнению с условиями резания при позиционном управлении.

5. На основе экспериментальных исследований установлено, что алгоритм управления позволяет обеспечить шероховатость поверхности R_a 0.8...1.2 мкм и точность в допуске 0.2 мм.

6. Проведенные эксперименты на промышленной детали (лопатка компрессора ГТД) показали эффективность функционирования алгоритма с обеспечением шероховатости поверхности менее R_a 1 мкм.

7. В результате проведенных исследований установлены экспериментальные взаимосвязи, характеризующие влияние технологических режимов (частоты вращения инструмента, скорости подачи и границ интервала допустимых силовых факторов) на величину шероховатости поверхности. Полученные уравнения регрессии обеспечивают возможность анализа влияния исследуемых факторов на целевую функцию.

8. Установлено существенное снижение величины шероховатости: значение среднего арифметического отклонения профиля уменьшилось с R_a 2,4 мкм до R_a 0,9 мкм, что свидетельствует о обеспечении требуемого качества поверхности.

9. Разработан программный продукт «Программа управления роботизированной отделочной обработкой в условиях неравномерного припуска для обеспечения технологической надежности операции на основе сигналов силомоментного датчика», зарегистрированный в Реестре программ для ЭВМ (свидетельство № 2025695238 от 10 декабря 2025 г.). Программное обеспечение предназначено для реализации адаптивного управления процессом роботизированной механической обработки криволинейных поверхностей в условиях неравномерного припуска, что позволяет обеспечить технологическую надежность операции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. — Москва: Машиностроение, 2002. — 684 с. ISBN 5-217-03127-5.
2. Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. — 2-е изд., перераб. и доп. — Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2008. — 694 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. Т. 1 / под ред. А. С. Васильева, А. А. Кутина. — 6-е изд., перераб. и доп. — Москва: Инновационное машиностроение, 2018. — 756 с.
4. Управление робототехническими системами с силовой моментным чувствлением: учеб. пособие / И. Н. Егоров [и др.]; под ред. И. Н. Егорова. — Владимир: Владимирский государственный университет, 2005. — 276 с.
5. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход / С. Рассел, П. Норвиг; пер. с англ. — 2-е изд. — Москва: Вильямс, 2007. — 1408 с.
6. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. — Москва: Машиностроение, 1981. — 184 с.
7. Кристаль, М. Г. Обработка результатов планирования экстремального эксперимента: учеб. пособие / М. Г. Кристаль. — Волгоград: ВолгГТУ, 2019. — 70 с.
8. Кован, В. М. Основы технологии машиностроения / В. М. Кован, В. С. Корсаков, А. Г. Косилова. — Москва: Машиностроение, 1977. — 416 с.
9. Denavit, J. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices / J. Denavit, R. S. Hartenberg // ASME Journal of Applied Mechanics. — 1951. — Vol. 22. — P. 215–221.
10. Крейг, Д. Д. Введение в робототехнику. Механика и управление / Д. Д. Крейг; пер. с англ. — Москва: ДМК Пресс, 2018. — 564 с. — ISBN 978-5-97060-644-6.
11. Вартанов, М. В. Методы подавления вибраций при роботизированной обработке / М. В. Вартанов, А. И. Шварц, Д. Н. Миронов //

СТАНКОИНСТРУМЕНТ. — 2023. — № 3 (032). — С. 34–41. — DOI: 10.22184/2499-9407.2023.32.3.34.41.

12. Вартанов, М. В. Технологическое обеспечение качества при роботизированной отделочной обработке на основе средств адаптации / М. В. Вартанов, А. И. Шварц, Д. Н. Миронов // Научные технологии в машиностроении. — 2025. — № 6 (168). — С. 31–38. — DOI: 10.30987/2223-4608-2025-6-31-38.

13. Вартанов, М. В. Технологические возможности роботизированной отделочной обработки деталей в условиях многономенклатурного производства / М. В. Вартанов, И. Н. Зинина, Д. О. Зотин // Вестник РГАТУ. — 2017. — № 1 (40). — С. 190–193.

14. Шварц, А. И. Роботизированная отделочная обработка в условиях неравномерного припуска на основе средств активной адаптации / А. И. Шварц // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2025. — № 12. — С. 567–572. — DOI: 10.24412/2071-6168-2025-12-567-568.

15. Вартанов, М. В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхности на роботизированных отделочных операциях / М. В. Вартанов, А. И. Шварц // Вестник МГТУ «СТАНКИН». — 2026. — № 1. — С. 66–75. — DOI: 10.47617/2072-3172-2026-1-66.

16. Almaged, M. Forward and Inverse Kinematic Analysis and Validation of the ABB IRB 140 Industrial Robot / M. Almaged // Journal of Mechanical Engineering and Technology (JMET). — 2017. — Vol. 9, no. 2. — P. 1–20.

17. Ji, W. A big data analytics based machining optimization approach / W. Ji, S. Yin, L. Wang // Journal of Intelligent Manufacturing. — 2018. — DOI: 10.1007/s10845-018-1440-9.

18. Chen, C. Stiffness performance index based posture and feed orientation optimization in robotic milling process / C. Chen, F. Peng, R. Yan, Y. Li, D. Wei, Z. Fan, X. Tang, Z. Zhu // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. — 2019. — Vol. 55. — P. 29–40. — DOI: 10.1016/j.rcim.2018.07.003.

19. Brüning, J. Simulation based planning of machining processes with industrial

robots / J. Brüning, B. Denkena, M.-A. Dittrich, H.-S. Park // *Procedia Manufacturing*. — 2016. — Vol. 6. — P. 17–24. — DOI: 10.1016/j.promfg.2016.11.003.

20. Cen, L. Effect of robot dynamics on the machining forces in robotic milling / L. Cen, S. N. Melkote // *Procedia Manufacturing*. — 2017. — Vol. 10. — P. 486–496. — DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.034.

21. Wang, Z. Active vibration control for robotic machining / Z. Wang, P. Keogh // *ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. — 2017. — V04AT05A030. — DOI: 10.1115/IMECE2017-72261.

22. Garnier, S. Modelling of robotic drilling / S. Garnier, K. Subrin, K. Waiyagan // *Procedia CIRP*. — 2017. — Vol. 58. — P. 416–421. — DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.246.

23. Furtado, L. F. F. A method to improve the use of 6-dof robots as machine tools / L. F. F. Furtado, E. Villani, L. G. Trabasso, R. Sutério // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 2017. — Vol. 92. — P. 2487–2502. — DOI: 10.1007/s00170-017-0336-8.

24. Matsuoka, S.-I. High-speed end milling of an articulated robot and its characteristics / S.-I. Matsuoka, K. Shimizu, N. Yamazaki, Y. Oki // *Journal of Materials Processing Technology*. — 1999. — Vol. 95. — P. 83–89. — DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00315-5.

25. Mejri, S. Dynamic characterization of machining robot and stability analysis / S. Mejri, V. Gagnol, T.-P. Le [и др.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 2016. — Vol. 82. — P. 351–359. — DOI: 10.1007/s00170-015-7336-3.

26. Pandremenos, J. Machining with robots: a critical review / J. Pandremenos, C. Doukas, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris // *7th International Conference on Digital Enterprise Technology*. — Athens, Greece, 2011.

27. Pan, Z. Robotic machining from programming to process control: a complete solution by force control / Z. Pan, H. Zhang // *Industrial Robot*. — 2015. — Vol. 35, no. 5. — P. 400–409.

28. Sörnmo, O. Increasing the Milling Accuracy for Industrial Robots Using a

Piezo-Actuated High Dynamic Micro Manipulator / O. Sörnmo, B. Olofsson, U. Schneider, A. Robertsson, R. Johansson // 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). — 2012. — P. 205–210.

29. Höfener, M. A method for increasing the accuracy of “on-workpiece” machining with small industrial robots for composite repair / M. Höfener, T. Schüppstuhl // Production Engineering. — 2014. — Vol. 8. — P. 701–709. — DOI: 10.1007/s11740-014-0570-y

30. Kothe, S. Accuracy analysis and error source identification for optimization of robot-based machining systems for aerospace production / S. Kothe, S. P. V. Stürmer, H. C. Schmidt [и др.] // SAE Technical Paper. — 2016. — No. 2016-01-2137. — DOI: 10.4271/2016-01-2137.

31. Kubela, T. Assessment of industrial robots accuracy in relation to accuracy improvement in machining processes / T. Kubela, A. Pochyly, V. Singule // Proceedings of the 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC). — 2016. — P. 720–725. — DOI: 10.1109/EPEPEMC.2016.7752083.

32. Cordes, M. Offline simulation of path deviation due to joint compliance and hysteresis for robot machining / M. Cordes, W. Hintze // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2017. — Vol. 90. — P. 1075–1083. — DOI: 10.1007/s00170-016-9461-z.

33. Slamani, M. Comparison of surface roughness quality obtained by high speed CNC trimming and high speed robotic trimming for CFRP laminate / M. Slamani, S. Gauthier, J.-F. Chatelain // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. — 2016. — Vol. 42. — P. 63–72. — DOI: 10.1016/j.rcim.2016.05.004.

34. Barnfather, J. D. A performance evaluation methodology for robotic machine tools used in large volume manufacturing / J. D. Barnfather, M. J. Goodfellow, T. Abram // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. — 2016. — Vol. 37. — P. 49–56. — DOI: 10.1016/j.rcim.2015.06.002.

35. Lehmann, C. Milling with industrial robots: strategies to reduce and compensate process force induced accuracy influences / C. Lehmann, M. Halbauer, D. Euhus, D. Overbeck // IEEE International Conference on Emerging Technologies and

Factory Automation (ETFA). — 2012. — DOI: 10.1109/ETFA.2012.6489741.

36. Xie, Y. Design of robotic end-effector for milling force control / Y. Xie, W. Zou, Y. Yang, J. Li // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Vol. 423. — Art. 012032. — DOI: 10.1088/1757-899X/423/1/012032.

37. Diaz Posada, J. R. High accurate robotic drilling with external sensor and compliance model-based compensation / J. R. Diaz Posada, U. Schneider, S. Pidan [и др.] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2016. — P. 3901–3907. — DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487579.

38. Qin, C. A novel approach for the acquisition of vibration signals of the end effector in robotic drilling / C. Qin, J. Tao, M. Wang, C. Liu // 2016 IEEE/CSAA International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS). — 2016. — P. 522–526. — DOI: 10.1109/AUS.2016.7748106.

39. Brunete, A. Hard material small-batch industrial machining robot / A. Brunete, E. Gambao, J. Koskinen [и др.] // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. — 2018. — Vol. 49. — P. 77–87. — DOI: 10.1016/j.rcim.2017.11.004.

40. He, F. A chatter-free path optimization algorithm based on stiffness orientation method for robotic milling / F. He, Y. Liu, K. Liu // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2018. — DOI: 10.1007/s00170-018-3099-y.

41. Schneider, U. Automatic pose optimization for robotic processes / U. Schneider, J. R. Diaz Posada, A. Verl // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2015. — P. 2054–2059. — DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139468.

42. Bu, Y. Stiffness analysis and optimization in robotic drilling application / Y. Bu, W. Liao, W. Tian, J. Zhang, L. Zhang // Precision Engineering. — 2017. — Vol. 49. — P. 388–400. — DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.04.001.

43. Jinno, M. Development of a force-controlled robot for grinding, chamfering and polishing / M. Jinno, F. Ozaki, T. Yoshimi [и др.] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 1995. — Vol. 2. — P. 1455–1460. — DOI: 10.1109/ROBOT.1995.525481.

44. Villagrossi, E. A human mimicking control strategy for robotic deburring of

hard materials / E. Villagrossi, N. Pedrocchi, M. Beschi, L. Molinari Tosatti // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. — 2018. — Vol. 31, no. 9. — P. 869–880. — DOI: 10.1080/0951192X.2018.1447688.

45. Diao, S. Development and evaluation of a 3D vision system for grinding robot / S. Diao, X. Chen, J. Luo // Sensors. — 2018. — Vol. 18, no. 9. — P. 1–20. — DOI: 10.3390/s18093078.

46. Katić, D. Classification and learning of robot-environment dynamic models / D. Katić, M. Vukobratović // Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 1997. — P. 2632–2637.

47. Katić, D. A neural network-based classification of environment dynamics models for compliant control of manipulation robots / D. Katić, M. Vukobratović // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part B: Cybernetics. — 1998. — Vol. 28, no. 1. — P. 58–69. — DOI: 10.1109/3477.658578.

48. Zhang, H. Machining with flexible manipulator: toward improving robotic machining performance / H. Zhang, J. Wang, G. Zhang [и др.] // Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. — 2005. — P. 1127–1132. — DOI: 10.1109/AIM.2005.1511161.

49. Dumas, C. Joint stiffness identification of six-revolute industrial serial robots / C. Dumas, S. Caro, S. Garnier, B. Furet // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. — 2011. — Vol. 27, no. 4. — P. 881–888. — DOI: 10.1016/j.rcim.2011.02.003.

50. Denkena, B. Design and optimization of a machining robot / B. Denkena, B. Bergmann, T. Lepper // Procedia Manufacturing. — 2017. — Vol. 14. — P. 89–96.

51. Caro, S. Workpiece placement optimization for machining operations with a KUKA KR270-2 robot / S. Caro, C. Dumas, S. Garnier, B. Furet // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2013. — P. 2921–2926. — DOI: 10.1109/ICRA.2013.6630982

52. Caro, S. Workpiece placement optimization in robotic-based manufacturing / S. Caro, C. Dumas, S. Garnier, B. Furet // IFAC Proceedings Volumes. — 2013. — Vol. 46, no. 9. — P. 91–96.

53. Caro, S. Workpiece placement optimization for machining operations with industrial robots / S. Caro, S. Garnier, B. Furet [и др.] // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). — 2014. — P. 1716–1721. — DOI: 10.1109/AIM.2014.6878331.

54. Garnier, S. Quality certification and productivity optimization in robotic-based manufacturing / S. Garnier, C. Dumas, S. Caro, B. Furet // IFAC Proceedings Volumes. — 2013. — Vol. 46, no. 9. — P. 97–102.

55. Klimchik, A. Experimental study of robotic-based machining / A. Klimchik, A. Ambiehl, S. Garnier, B. Furet, A. Pashkevich // IFAC-PapersOnLine. — 2016. — Vol. 49, no. 12. — P. 174–179. — DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.591.

56. Klimchik, A. Efficiency evaluation of robots in machining applications using industrial performance measure / A. Klimchik, A. Ambiehl, S. Garnier, B. Furet, A. Pashkevich // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. — 2017. — Vol. 48. — P. 12–29. — DOI: 10.1016/j.rcim.2016.12.005.

57. Subrin, K. Performance criteria to evaluate a kinematically redundant robotic cell for machining tasks / K. Subrin, L. Sabourin, G. Gogu, Y. Mezouar // Applied Mechanics and Materials. — 2012. — Vol. 162. — P. 413–422. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.162.413.

58. Lin, Y. Posture optimization methodology of 6R industrial robots for machining using performance evaluation indexes / Y. Lin, H. Zhao, H. Ding // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. — 2017. — Vol. 48. — P. 59–72. — DOI: 10.1016/j.rcim.2017.02.002.

59. Xiong, G. Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling / G. Xiong, Y. Ding, L. M. Zhu // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. — 2019. — Vol. 55. — P. 19–28. — DOI: 10.1016/j.rcim.2018.07.001.

60. Xie, H. Posture Optimization Based on Both Joint Parameter Error and Stiffness for Robotic Milling / H. Xie, W. Li, Z. Yin // Intelligent Robotics and Applications: ICIRA 2018/Springer International Publishing, 2018. — P. 277–286.

61. Mousavi, S. Dynamic modeling and stability prediction in robotic machining / S. Mousavi, V. Gagnol, B. C. Bouzgarrou, P. Ray // The International Journal of

Advanced Manufacturing Technology. — 2017. — Vol. 88, no. 9–12. — P. 3053–3065. — DOI: 10.1007/s00170-016-8938-0.

62. Mousavi, S. Stability optimization in robotic milling through the control of functional redundancies / S. Mousavi, V. Gagnol, B. C. Bouzgarrou, P. Ray // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. — 2018. — Vol. 50. — P. 181–192. — DOI: 10.1016/j.rcim.2017.09.004.

63. Karim, A. Analysis of the dynamic behavior of a six-axis industrial robot within the entire workspace in respect of machining tasks / A. Karim, J. Hitzer, A. Lechler, A. Verl // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). — 2017. — P. 670–675. — DOI: 10.1109/AIM.2017.8014094.

64. Pan, Z. Z. Chatter analysis of robotic machining process / Z. Z. Pan, H. Zhang, Z. Zhu, J. Wang // Journal of Materials Processing Technology. — 2006. — Vol. 173, no. 3. — P. 301–309. — DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.11.033.

65. Abele, E. Modeling and identification of an industrial robot for machining applications / E. Abele, M. Weigold, S. Rothenbücher // CIRP Annals — Manufacturing Technology. — 2007. — Vol. 56, no. 1. — P. 387–390. — DOI: 10.1016/j.cirp.2007.05.090.

66. Cordes, M. Chatter stability in robotic milling / M. Cordes, W. Hintze, Y. Altintas // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. — 2019. — Vol. 55. — P. 11–18. — DOI: 10.1016/j.rcim.2018.07.004.

67. Safi, S. M. A new approach for chatter prediction in robotic milling based on signal processing in time domain / S. M. Safi, H. Amirabadi, I. Lirabi, K. Khalili, S. Rahnama // Applied Mechanics and Materials. — 2013. — Vol. 346. — P. 45–51. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.346.45.

68. Vieler, H. Drive based damping for robots with secondary encoders / H. Vieler, A. Karim, A. Lechler // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. — 2017. — Vol. 47. — P. 117–122. — DOI: 10.1016/j.rcim.2017.03.007.

69. Yuan, L. Mode coupling chatter suppression for robotic machining using semi-active magnetorheological elastomers absorber / L. Yuan, S. Sun, Z. Pan [и др.] // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2019. — Vol. 117. — P. 221–237. —

DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.07.051.

70. Yuan, L. A study of chatter in robotic machining and a semi-active chatter suppression method using magnetorheological elastomers (MREs) : PhD Thesis / L. Yuan. — Wollongong : University of Wollongong, 2017.

71. Puzik, A. Industrial robots for machining processes in combination with a 3D-piezo-compensation mechanism / A. Puzik, C. Meyer, A. Verl // CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME). — 2010.

72. Guo, Y. Vibration analysis and suppression in robotic boring process / Y. Guo, H. Dong, G. Wang, Y. Ke // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2016. — Vol. 101. — P. 102–110. — DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.11.011.

73. Olofsson, B. Modeling and control of a piezo-actuated high-dynamic compensation mechanism for industrial robots / B. Olofsson, O. Sörnmo, U. Schneider [и др.] // 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. — 2011. — P. 4704–4709.

74. Lehmann, C. Machining with industrial robots: the COMET project approach / C. Lehmann, M. Pellicciari, M. Drust, J. W. Gunnink // Robotics in Smart Manufacturing / Springer, 2013. — P. 27–36.

75. Schneeider, U. Experimental investigation of sources of error in robot machining / U. Schneider, M. Ansaloni, M. Drust, F. Leali, A. Verl // Robotics in Smart Manufacturing / Springer, 2013. — P. 14–26.

76. Schneeider, U. Compensation of errors in robot machining with a parallel 3D-piezo compensation mechanism / U. Schneider, M. Drust, A. Puzik, A. Verl // Procedia CIRP. — 2013. — Vol. 7. — P. 305–310. — DOI: 10.1016/j.procir.2013.05.052.

77. Atmosudiro, A. Productivity increase through joint space path planning for robot machining / A. Atmosudiro, M. Keinert, A. Karim [и др.] // Proceedings of the UKSim-AMSS 8th European Modelling Symposium on Computer Modelling and Simulation (EMS). — 2014. — P. 257–262. — DOI: 10.1109/EMS.2014.46.

78. Wang, G. Dynamic cutting force modeling and experimental study of industrial robotic boring / G. Wang, H. Dong, Y. Guo, Y. Ke // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2016. — Vol. 86, no. 1–4. — P. 179–190. —

DOI: 10.1007/s00170-015-8166-z.

79. Wang, G. Chatter mechanism and stability analysis of robotic boring / G. Wang, H. Dong, Y. Guo, Y. Ke // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 2017. — Vol. 91, no. 1–4. — P. 411–421. — DOI: 10.1007/s00170-016-9731-9.

80. Guo, Y. A robotic boring system for intersection holes in aircraft assembly / Y. Guo, H. Dong, G. Wang // *Industrial Robot: An International Journal*. — 2018. — Vol. 45, no. 3. — P. 328–336. — DOI: 10.1108/IR-09-2017-0176.

81. Huynh, H. N. Multibody modelling of a flexible 6-axis robot dedicated to robotic machining / H. N. Huynh, E. Riviere-Lorphevre, O. Verlinden // *Proceedings of the 5th Joint International Conference on Multibody System Dynamics*. — 2018. — P. 1–18.

82. Dong, S. Stability of lateral vibration in robotic rotary ultrasonic drilling / S. Dong, K. Zheng, W. Liao // *International Journal of Mechanical Sciences*. — 2018. — Vol. 145. — P. 346–352. — DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.07.004.

83. Dong, S. Investigation on exit burr in robotic rotary ultrasonic drilling of CFRP/aluminum stacks / S. Dong, W. Liao, K. Zheng, J. Liu, J. Feng // *International Journal of Mechanical Sciences*. — 2019. — Vol. 151. — P. 868–876. — DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.12.039.

84. Tratar, J. Tool wear performance evaluation in MDF machining with anthropomorphic robot / J. Tratar, F. Pušavec, J. Kopač // *Tehnički Vjesnik*. — 2014. — Vol. 21, no. 5. — P. 911–915.

85. Schreck, G. HEPHESTOS: hard material small-batch industrial machining robot / G. Schreck, D. Surdilovic, J. Krüger // *ISR/Robotik 2014 : Proceedings of the 41st International Symposium on Robotics*. — Berlin : VDE Verlag, 2014. — P. 1–6.

86. Tratar, J. Robot milling of welded structures / J. Tratar, J. Kopač // *Journal of Production Engineering*. — 2013. — Vol. 16. — P. 29–32.

87. Gienke, O. Mode coupling chatter prediction and avoidance in robotic machining process / O. Gienke, Z. Pan, L. Yuan [и др.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 2019. — Vol. 104. — P. 2103–2116.

88. Chen, F. Contact force control and vibration suppression in robotic polishing with a smart end effector / F. Chen, H. Zhao, D. Li, [и др.] // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. — 2019. — Vol. 57. — P. 391–403. — DOI: 10.1016/j.rcim.2018.12.019.

89. Schneider, U. Improving robotic machining accuracy through experimental error investigation and modular compensation / U. Schneider, M. Drust, M. Ansaloni [и др.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 2016. — Vol. 85. — P. 3–15. — DOI: 10.1007/s00170-014-6021-2.

90. Du, H. Automatic robotic polishing on titanium alloy parts with compliant force/position control / H. Du, Y. Sun, D. Feng [и др.] // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. — 2015. — Vol. 229, no. 7. — P. 1180–1192. — DOI: 10.1177/0954405414567148.

91. Chin, J. H. A path algorithm for robotic machining / J. H. Chin, H. C. Tsai // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. — 1993. — Vol. 10, no. 3. — P. 185–198. — DOI: 10.1016/0736-5845(93)90054-N.

92. Kržič, P. Kinematic constraints and offline programming in robotic machining / P. Kržič, F. Pušavec, J. Kopač // *Tehnički Vjesnik*. — 2013. — Vol. 20, no. 1. — P. 117–124.

93. Slamani, M. Analysis of trajectory deviation during high speed robotic trimming of carbon-fiber reinforced polymers / M. Slamani, S. Gauthier, J.-F. Chatelain // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. — 2014. — Vol. 30, no. 5. — P. 546–555. — DOI: 10.1016/j.rcim.2014.03.007.

94. Xiong, G. A feed-direction stiffness based trajectory optimization method for a milling robot / G. Xiong, Y. Ding, L. Zhu // *Intelligent Robotics and Applications : ICIRA 2017 / Springer, 2017*. — P. 184–195.

95. Villagrossi, E. Robot dynamics modelling and control for machining applications : PhD Thesis / E. Villagrossi. — Brescia : Università degli Studi di Brescia, 2016.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Фрагмент кода RobotStudio роботизированной механической обработки

```

MODULE ABB2
PERS bool startsync := TRUE;
VAR robtarget pCurrentPos; VAR num x; VAR num y;
VAR num z; VAR num Fx_1:=0; VAR num Fy_1:=0; VAR num Fz_1:=0;
VAR num Mx_1:=0; VAR num My_1:=0; VAR num Mz_1:=0;
VAR num F; VAR num M; VAR num Flim;
VAR num FXlim; VAR num FYlim; VAR num FZlim;
VAR num F2Xlim; VAR num F2Ylim; VAR num F2Zlim;
VAR num Fx_mul:=0.00607;
VAR num Fy_mul:=0.00612;
VAR num Fz_mul:=0.00609;
VAR num Mx_mul:=0.000153;
VAR num My_mul:=0.000153;
VAR num Mz_mul:=0.000153;
pers num work_speed;
PERS tooldata tool7:=[TRUE, [[106.278,110.551,128.448],[0.64902,-
0.27269,0.65462,0.27545]], [0.001,[0,0, 0.001],[1,0,0, 0],0,0, 0]];
PERS wobjdata wobj7:=[FALSE,TRUE,"",[[322,465,250],[1,0,0,0]],[[0,0,0],[1,0,0,0]]];
VAR num max_speed_spindle:=100;
VAR num culc_volt;
VAR num speed_spindle:=30;
VAR num work_speed1:=25;
VAR tasks checkforce;
CONST num p := 9E+9;
CONST num k :=10;
CONST num k1 := 15;

PROC MAIN()
waituntil startsync;
work_speed := func_force(work_speed);
ENDPROC

FUNC num func_force(num work_speed)

```

```

IF giFx >= 32768 THEN FX_1:=(GIFX-65535)FX_MUL;
ELSE FX_1:=(GIFX)FX_MUL;
ENDIF
IF GIFY >= 32768 THEN FY_1:=(GIFY-65535)FY_MUL;
ELSE FY_1:=(GIFY)FY_MUL;
ENDIF
IF GIFZ >= 32768 THEN FZ_1:=(GIFZ-65535)FZ_MUL;
ELSE FZ_1:=(GIFZ)FZ_MUL;
ENDIF
IF GITX >= 32768 THEN MX_1:=(GITX-65535)MX_MUL;
ELSE MX_1:=(GITX)MX_MUL;
ENDIF
IF GITY >= 32768 THEN MY_1:=(GITY-65535)MY_MUL;
ELSE MY_1:=(GITY)MY_MUL;
ENDIF
IF GITZ >= 32768 THEN _1:=(GITZ-65535)MZ_MUL;
ELSE MZ_1:=(GITZ)MZ_MUL;
ENDIF
!pCurrentPos := CRobT(); ! Запрос текущей позиции
!x := pCurrentPos.trans.x; ! Извлечение координаты X
!y := pCurrentPos.trans.y; ! Извлечение координаты Y
!z := pCurrentPos.trans.z; ! Извлечение координаты Z
IF FX_1> FXlim OR FX_1> FYlim OR FX_1> FZlim THEN
    work_speed = 50;
ENDIF
IF FX_1< F2Xlim OR FX_1< F2Ylim OR FX_1< F2Zlim THEN
    work_speed = 100;
ENDIF
ENDFUNC
PROC s_spindle()
TPERase;
culc_volt:=10speed_spindle/max_speed_spindle; SetAO DA_Aout1,culc_volt;
WaitTime 0.5; SetDO do_Reverse,1; SetDO do_SpindelOn,1;
WaitTime 3; WaitDI DI10_4_Ready,1;
ENDPROC

```

PROC calib()

```
MoveABSJ [[-15.617,36.887,-15.436,95.768,14.462,-
56.841],[p,p,p,p,p,p]],[work_speed1,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[478,-485,188],[0.121,-0.121,-0.697,-0.697],[-1,1,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]],[work_speed1,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveABSJ [[2.862,27.551,-14.477,181.761,13.411,-
227.327],[p,p,p,p,p,p]],[work_speed1,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[478,-425,183],[0,-0.018,1,0],[0,2,-
3,0],[p,p,p,p,p,p]],[work_speed1,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
ENDPROC
```

PROC main2()

```
startsync := TRUE;
ConfL \Off;
!s_spindle;
MoveABSJ [[-1.624,30.068,-19.799,109.698,-1.162,-
152.63],[p,p,p,p,p,p]],[work_speed1,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveABSJ [[-1.546,29.897,-18.774,78.669,-6.797,-
121.598],[p,p,p,p,p,p]],[work_speed1,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[466.749,-419.312,145],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]],[work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[466.749,-419.312,137.2],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]],[work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[466.749,-419.312,137.001],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]],[work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[466.749,-419.312,136.902],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]],[work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[466.749,-419.312,136.703],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]],[work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[466.749,-419.312,136.604],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]],[work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[466.749,-419.312,136.405],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]],[work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[466.749,-419.312,136.306],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]],[work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
```

MoveL [[466.749,-419.312,136.107],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,136.007],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,135.809],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,135.709],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,135.511],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,135.411],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,135.212],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,135.113],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,134.914],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,134.815],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,134.616],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,134.517],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,134.318],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,134.219],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,134.02],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,133.92],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,133.722],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;

MoveL [[466.749,-419.312,133.622],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,133.424],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,133.324],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,133.125],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,133.026],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,132.827],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,132.728],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,132.529],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,132.43],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,132.231],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,132.132],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,131.933],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,131.834],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,131.635],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,131.535],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,131.337],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,131.237],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;

MoveL [[466.749,-419.312,131.039],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,130.939],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,130.74],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,130.641],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,130.442],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,130.343],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,130.144],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,130.045],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,129.846],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,129.747],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,129.548],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,129.448],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,129.25],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.787,-419.323,129.2],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.704,-419.302,127.6],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,127.55],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
 MoveL [[466.749,-419.312,127.35],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
 1,0],[p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;

```

MoveL [[466.749,-419.312,127.25],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[466.749,-419.312,127.05],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[466.749,-419.312,126.95],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[466.787,-419.323,126.8],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[466.864,-419.346,126.8],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[467.034,-419.399,126.8],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[467.126,-419.431,126.8],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[467.31,-419.496,126.8],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[467.401,-419.528,126.8],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[467.585,-419.593,126.8],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[467.677,-419.625,126.8],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[467.86,-419.69,126.8],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[467.952,-419.723,126.8],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[468.135,-419.787,126.8],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;
MoveL [[468.227,-419.82,126.8],[0,-0.022,1,0],[0,0,-
1,0],[p,p,p,p,p,p]], [work_speed,100,100,100],[true,k,k,k,k,k,k],tool7\WObj:=wobj7;

```

ENDPROC

ENDMODULE

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Постпроцессор промышленного робота ABB

model_of_robot[3]="IRB140"

num_of_char=0

output "VERSION:1"

output "LANGUAGE:ENGLISH"

output "%%%"

output "MODULE ABB"

output "PLACE FOR TOOL"

output "PLACE FOR CS"

output "PROC main()"

output "ConfL \Off;"

X,Y,Z:Real !position of tool

Ax,By,Cz,Nw:Real !orientation of tool

e_pos,f_pos,g_pos,h_pos: integer !position of robot

E1,E2,E3,E4,E5,E6: real

E1_prev, E2_prev, E3_prev, E4_prev, E5_prev, E6_prev: real

mid_end: integer !middle or end of circle, for external axes

!A3_simp_ext: integer !A3_simp_ext=0 simple A3 works as in CAM

A3_simp_ext=1 extended A3=A3+A2

v_tcp,v_ori,v_leax,v_reax: integer !speed TCP

finep: string !Defines whether the movement is to terminate as a stop point (finepoint)
or as a fly-by point.

pzone_tcp,pzone_ori,pzone_eax,zone_ori,zone_leax,zone_reax: real

CS_txt,TOOL_txt: string !string for all CS and TOOL

numCS,numCS_prev,numTool,numTool_prev: integer !Num CS,Tool

current_command\$:string

ext_axis_str: string

num_of_char:integer !current number of characters

MAX_num_of_characters:integer !max number of characters

AIndex: array of Integer ! Indexes of A-axes in machine schema

```

Current_model:string          !Current_model of robot
ask_again: integer            !1-don't ask again      0-ask next time
WorkpieceHolder: integer      !0-ToolHolder 1-WorkPieceHolder
abs_incr: integer              !0-absolute 1-increment

end
]]>

if WorkpieceHolder = 0 then begin      !ToolHolder
    if numTool <> CLD.N then begin
        numTool = CLD.N
        if LEN(Tool_txt) > 0 then tmp_str = chr(10) else tmp_str = ""
        Tool_txt = Tool_txt + tmp_str + "PERS tooldata tool" + str(numTool) +
":=[TRUE, [" +
        str(CLD.X)+", " + str(CLD.Y)+", " + str(CLD.Z)+"], [" +
        str(CLD.NW:5)+", " + str(CLD.NX:5)+", " + str(CLD.NY:5)+", " +
str(CLD.NZ:5)+
        "]], [0.001, [0, 0, 0.001], [1, 0, 0, 0], 0, 0, 0]];"
    end
end

if WorkpieceHolder=1 then begin      !PartHolder
    if numCS <> CLD.N then begin
        numCS = CLD.N
        numCS_prev = numCS
        if LEN(CS_txt)>0 then tmp_str = chr(10) else tmp_str=""
        CS_txt = CS_txt + tmp_str + "PERS wobjdata wobj" + str(numCS) +
        ":[FALSE, TRUE, " + chr(34) + chr(34) +
", [" + str(CLD.X)+", " + str(CLD.Y)+", " + str(CLD.Z) + "], [" +
str(CLD.NW:5)+", " + str(CLD.NX:5)+", " + str(CLD.NY:5)+", " + str(CLD.NZ:5)+
        "]], [[0,0,0], [1,0,0,0]]];"
    end
end

```

```

if WorkingMode = 1 then begin ! Return the tool and CS if the same one is used
  if TOOL_txt = "" then
    TOOL_txt = save_tool
  if CS_txt = "" then
    CS_txt = save_cs
end
end

!----first point(MidPosition)----
call A1_A6(19+CLD.EndAxesCount*2, CLD.MidAxesCount)
call robot_position
mid_end=1
call Ext_Axis                      !check external axis
X = CLD.MPX; Y = CLD.MPY; Z = CLD.MPZ
Ax = CLD.MPNX; By = CLD.MPNY; Cz = CLD.MPNZ; Nw = CLD.MPNW
call check_zero_value              !from X-0.000 to make X0.000
current_command$ = "MoveC [" + Str(X) + "," + Str(Y) + "," + Str(Z) + "],[" +
  Str(Nw) + "," + Str(Ax) + "," + Str(By) + "," + Str(Cz) +
  "],[" + str(e_pos) + "," + str(f_pos) + "," + str(g_pos) + ",0],[" + ext_axis_str
num_of_char = num_of_char + LEN(current_command$)
output current_command$

!----second point(EndPosition)----
call A1_A6(19, CLD.EndAxesCount)
call robot_position
mid_end=2
call Ext_Axis                      !check external axis
X=CLD.EPX; Y=CLD.EPY; Z=CLD.EPZ
Ax=CLD.EPNX; By=CLD.EPNY; Cz=CLD.EPNZ; Nw=CLD.EPNW
call check_zero_value              !from X-0.000 to make X0.000
current_command$ = "  MoveL [" + Str(X) + "," + Str(Y) + "," + Str(Z) + "],[" +
  Str(Nw) + "," + Str(Ax) + "," + Str(By) + "," + Str(Cz) +

```

```

"],[" + str(e_pos) + "," + str(f_pos) + "," + str(g_pos) + ",0], " + ext_axis_str +
"[" + str(v_tcp) + "," + str(v_ori) + "," + str(v_leax) + "," + str(v_reax) + "]" +
"," + "[" + finep + "," + str(pzone_tcp) + "," + str(pzone_ori) + "," +
str(pzone_eax) + "," +
str(zone_ori) + "," + str(zone_leax) + "," + str(zone_reax) + "]" +
",tool" + str(numTool) + "\\WObj:=wobj" + str(numCS) + ";"
num_of_char = num_of_char + LEN(current_command$)
output current_command$
MaxReal=99999999.999
A1=0; A2=0; A3=0; A4=0; A5=0; A6=0
e_pos=0; f_pos=0; g_pos=0; h_pos=0
numTool=99; numCS_prev=99
num_of_char=0
current_num_file=1
E1=MaxReal; E2=MaxReal; E3=MaxReal; E4=MaxReal; E5=MaxReal; E6=MaxReal;
E1_prev=MaxReal; E2_prev=MaxReal; E3_prev=MaxReal; E4_prev=MaxReal;
E5_prev=MaxReal; E6_prev=MaxReal;
v_tcp=0          ! The velocity of the tool center point (TCP) in mm/s.
v_ori=500        ! The reorientation velocity of the TCP expressed in degrees/s.
v_leax=5000      ! The velocity of linear external axes in mm/s.
v_reax=500       ! The velocity of rotating external axes in degrees/s.
!ZONE DATA
finep="TRUE"      !Defines whether the movement is to terminate as a stop point
(finepoint) or as a fly-by point.
pzone_tcp=0.5     !-The size of the TCP zone in mm.
pzone_ori=0.5     !-The size for the tool reorientation. The size is defined as the
distance of the TCP from the programmed point in mm.
pzone_eax=0.5     !-The size for external axes. The size is defined as the distance of
the TCP from the programmed point in mm.
zone_ori=0.05     !-The size for the tool reorientation in degrees. If the robot is

```

holding the work object, this

! means an angle of rotation for the work object.

zone_leax=0.5 !-The size for linear external axes in mm.

zone_reax=0.05 !-The size for rotating external axes in degrees.

if WorkingMode = 1 then

MAX_num_of_characters = MaxReal else

MAX_num_of_characters = 2000000

$$\text{abs_incr} = 1$$

call ReadMachineAxesIndexes

call Title_of_program

end

```
call A1_A6(11, CLD.AxesCount)
```

```
call robot_position
```

call Ext Axis	!check external axis
---------------	----------------------

```
X=CLD[1]; Y=CLD[2]; Z=CLD[3]
```

$$A_x = \text{CLD}[4]; B_y = \text{CLD}[5]; C_z = \text{CLD}[6]; N_w = \text{CLD}[7]$$

```
current_command$= "MoveABSJ" [[
```

```
+str(A1)+"," +str(A2)+"," +str(A3)+"," +str(A4)+"," +str(A5)+"," +str(A6)+
```

```
"],"+ext_axis_str+"["+str(v_tcp)+","+str(v_ori)+","+str(v_leax)+","+str(v_reax)+"]"+
```

```

", "+"[" + finep + ", " + str(pzone_tcp) + ", " + str(pzone_ori) + ", " + str(pzone_eax) + ", " + str(zone_
ori) + ", " + str(zone_leax) + ", " + str(zone_reax) + "]" +

```

```
","tool"+str(numTool)+"\WObj:=wobj"+str(numCS)+";"
```

output current_command\$

```
num of char=num of char+LEN(current command$)
```

```
spp_dir$ = copy(spppath$, 1, pos(sppname$, spppath$) - 1) + SPPName$ + ".dsk"
```

```
file_read$ = "if exist " + chr(34) + spp_dir$ + chr(34) + " (echo file exists) else (echo
IRB52 0> " + chr(34) + spp_dir$ + chr(34) + ")"
```

```
ShellExec file_read$
```

```
file read$ = ""
```

```
input file_read$ <- spp_dir$
```

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Регистрация программы ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025695238

**Программа управления роботизированной отделочной
обработкой в условиях неравномерного припуска для
обеспечения технологической надежности операции на
основе сигналов силомоментного датчика**

Правообладатель: **Шварц Александр Игоревич (RU)**

Авторы: **Шварц Александр Игоревич (RU), Вартанов
Михаил Владимирович (RU)**

Заявка № **2025687537**

Дата поступления **08 октября 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **10 декабря 2025 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 00a37044f7c4d80531b4b8818e75d29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.07.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акты внедрения



Юридический адрес: 143921, Московская обл., г.о.
Балашиха, д. Федюново, ул. Авиарембаса, д.8, офис 2
Фактический и Почтовый адрес: 111123, г. Москва,
ш. Энтузиастов, д. 56, стр. 47
Тел.: (495) 790-76-98
URL: www.galvent.ru Email: galvent@galvent.ru

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Шварца Александра Игоревича «Технологическое обеспечение точности и шероховатости при роботизированной механической обработке криволинейных поверхностей на основе средств адаптации», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 «Технология машиностроения» будут использованы в деятельности ООО «Фабрика Вентиляции ГалВент» в виде:

1. Методик построения зачистных роботизированных операций деталей с неравномерным припуском.
2. Алгоритма позиционно-силового управления промышленным роботом с учетом его жесткости
3. Рекомендации по наладке и настройке промышленного робота в условиях многономенклатурного производства.

Использование указанных результатов будет полезно при разработке робототехнического комплекса по зачистке кромок воздуховодов, что позволит повысить качество и производительность изготовления деталей.

Генеральный директор



Прахов К.В.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Шварца Александра Игоревича «Технологическое обеспечение точности и шероховатости при роботизированной механической обработке криволинейных поверхностей на основе средств адаптации», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 «Технология машиностроения» будут использованы в деятельности ПАО АК «РУБИН» в виде:

1. Методик построения операции роботизированной механической обработки.
2. Результатов экспериментальных исследований при назначении технологических режимов на финишных роботизированных операциях.
3. Рекомендаций по построению технологических наладок роботизированных операций отделочной обработки гидравлических агрегатов и систем.

Применение результатов работы ШВАРЦА А.И. позволит обеспечить стабильность качества деталей в условиях многономенклатурного производства, а также сократить трудоемкость слесарных работ в условиях ПАО АК «РУБИН».

Технический директор ПАО АК «РУБИН»

Р.П. Шуралев

