

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К. И. Сатпаева

Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева

Кафедра "Машиностроение"

Рақымбек Асанәлі Бақытжанұлы

«Разработка и исследование технологий сверления сквозных отверстий на  
станках с ЧПУ»

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

7М07112 – Цифровизация машиностроительного производства

Алматы 2026



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени  
К. И. Сатпаева

Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева

Кафедра "Машиностроение"

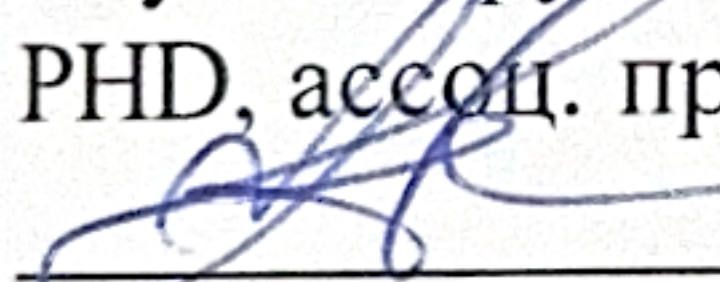

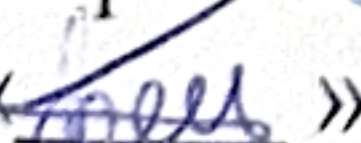
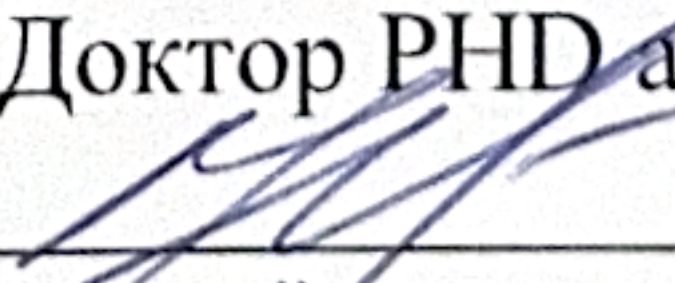
УДК 665.622.43.046.6-52 (043)

На правах рукописи

Рақымбек Асанәлі Бақытжанұлы

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

За на научное звание магистра

Название диссертации	Разработка и исследование технологий сверления сквозных отверстий на станках с ЧПУ
Направление	7M07112 – Цифровизация машиностроительного производства
Научный руководитель PhD, ассоц. проф.  Абілқайыр Ж.Н. "19" "01" 2026 г.	
Рецензент  Норма контроль «  » Бекбосынова Б.А. "21" "01" 2026 г.	ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ  Заведующий кафедрой «Машиностроение» Доктор PhD ассоц. проф.  Нұрман Е.З. "22" "01" 2026 г.

Алматы 2026



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К. И. Сатпаева

Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева

Кафедра " Машиностроение "

7М07112 – Цифровизация машиностроительного производства

Заведующий кафедрой «Машиностроение»

Доктор РНД ассоц. проф.

Нұрман Е.З.

« 28 » 01 2026 г.

**Задание для выполнения магистерской диссертации**

Магистрант Рақымбек Асанәлі Бақытжанұлы

Тема Разработка и исследование технологий сверления сквозных отверстий на станках с ЧПУ

Приказ № 548 - П/Ө

От 04.12.2023

Дата

здачи 28.01.2026.

Исходные данные магистерской диссертации: Разработка и исследование технологий сверления сквозных отверстий на станках с ЧПУ

Перечень вопросов, подлежащих разработке в магистерской диссертации

а) ЧПУ станки;

б) Сквозные отверстия на ЧПУ станках;

в) Улучшение точности сквозных отверстий;

г) Дополнительные модули для создания отверстий;

д) Разработка и создание нового модуля ;

е) Тест и характеристики модуля.

Перечень графических материалов (с точным указанием обязательных чертежей):

5-таблицы, 13-рисунков. 2 чертежа

1) Таблица 3.1 – Основные характеристики;

2) Рисунок 2 – Чертеж Корпус редуктора ;

3) Рисунок 8 – Вид спереди 3D модель ДСМ ;

4) Рисунок 13 – Установленный сверлильный модуль в станке;

5) Рекомендуемая основная литература 16 наименование




# РАСПИСАНИЕ

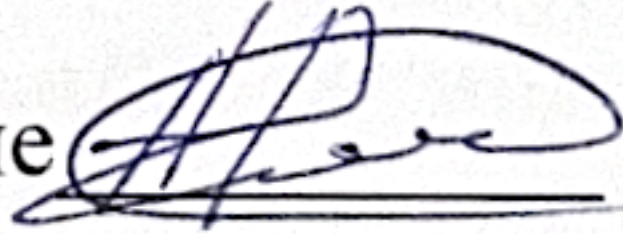
Подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень рассматриваемых вопросов	Сроки проверки научного руководителя	Замечание
ЧПУ станки	28.09.2025-01.10.2025	Выполнено
Анализ ЧПУ станков и сквозных отверстий	20.10.2025-11.11.2025	Выполнено
Изучение возможности создать дополнительный модуль для сквозных отверстий	10.11.2025-12.12.2025	Выполнено

Подписи консультантов и норм контролёров диссертаций за завершённую магистерскую диссертацию в соответствующих разделах

Наименование разделов	Советники, имя, отчество, фамилия (учёная степень, звание)	Дата подписи	Подпись
Норма контроль	Бекбосяева Б.А PhD, опытная	21.01.26	
Научный руководитель	Абілкайыр Ж.Н., PhD, асс. пр.		

Научный руководитель  Абілкайыр Ж.Н.

Обучающийся получил задание на выполнение  Рақымбек А. Б.

Дата

“ 19 ” 01 2026г.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К. И. Сатпаева

Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева

Кафедра "Машиностроение"

Рақымбек Асанәлі Бақытжанұлы

«Разработка и исследование технологий сверления сквозных отверстий на  
станках с ЧПУ»

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

7М07112 – Цифровизация машиностроительного производства

Алматы 2026



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К. И. Сатпаева

Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева

Кафедра "Машиностроение"

УДК 665.622.43.046.6-52 (043)

На правах  
рукописи

Рақымбек Асанәлі Бақытжанұлы

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

За на научное звание магистра

Название диссертации      Разработка и исследование технологий  
сверления сквозных отверстий на станках с ЧПУ

Направление                      7М07112 – Цифровизация  
   машиностроительного производства

Научный руководитель  
PhD, ассоц. проф.  
\_\_\_\_\_ Абілқайыр Ж.Н.  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2026 г.

Рецензент

\_\_\_\_\_

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**

Норма контроль  
« \_\_\_\_ »

Бекбосынова Б.А.  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2026 г.

Заведующий кафедрой  
«Машиностроение»  
Доктор PhD ассоц. проф.  
\_\_\_\_\_ Нұғман Е.З.  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2026 г.

Алматы 2026



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К. И. Сатпаева

Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева

Кафедра " Машиностроение "

7M07112 – Цифровизация машиностроительного производства

Заведующий кафедрой «Машиностроение»

Доктор PhD ассоц. проф.

Нұғман Е.З.

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 г.

**Задание для выполнения магистерской диссертации**

Магистрант Рақымбек Асанәлі Бақытжанұлы

Тема Разработка и исследование технологий сверления сквозных отверстий на станках с ЧПУ

Приказ \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

здачи \_\_\_\_\_

Исходные данные магистерской диссертации: Разработка и исследование технологий сверления сквозных отверстий на станках с ЧПУ

Перечень вопросов, подлежащих разработке в магистерской диссертации

а) ЧПУ станки;

б) Сквозные отверстия на ЧПУ станках;

в) Улучшение точности сквозных отверстий;

г) Дополнительные модули для создания отверстий;

д) Разработка и создание нового модуля ;

е) Тест и характеристики модуля.

Перечень графических материалов (с точным указанием обязательных чертежей):

5-таблицы, 13-рисунков. 2 чертежа

1) Таблица 3.1 – Основные характеристики;

2) Рисунок 2 – Чертеж Корпус редуктора ;

3) Рисунок 8 – Вид спереди 3D модель ДСМ ;

4) Рисунок 13 – Установленный сверлильный модуль в станке;

5) Рекомендуемая основная литература 16 наименование



## РАСПИСАНИЕ

### Подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень рассматриваемых вопросов	Сроки проверки научного руководителя	Замечание
ЧПУ станки	28.09.2025-01.10.2025	Выполнено
Анализ ЧПУ станков и сквозных отверстий	20.10.2025-11.11.2025	Выполнено
Изучение возможности создать дополнительный модуль для сквозных отверстий	10.11.2025-12.12.2025	Выполнено

**Подписи** консультантов и норм контролёров диссертаций за завершённую магистерскую диссертацию в соответствующих разделах

Наименование разделов	Советники, имя, отчество, фамилия (учёная степень, звание)	Дата подписи	Подпись
Норма контроль			
Научный руководитель			

Научный руководитель \_\_\_\_\_ Абілқайыр Ж.Н.

Обучающийся получил задание на выполнение \_\_\_\_\_ Рақымбек А. Б.

Дата

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20 г.



## АННОТАЦИЯ

В данной диссертации представлено комплексное исследование разработки, оптимизации и технологического совершенствования процессов сверления сквозных отверстий на станках с ЧПУ. Исследование решает давние проблемы сверления, такие как эффективность эвакуации стружки, тепловая нагрузка, прогрессирующее изнашивание инструмента и геометрическая точность, путем интеграции теоретического моделирования, численного моделирования и экспериментальной проверки. С использованием факторного метода экспериментов, оптимизации Тагути и статистического анализа на основе дисперсионного анализа были разработаны эмпирические модели для связи параметров сверления (скорости резания, подачи, состояния СОЖ и материала инструмента) с ключевыми показателями качества, включая шероховатость поверхности, отклонение диаметра и стойкость инструмента.

Важнейшим практическим результатом работы является создание нового вспомогательного горизонтально-сверлильного модуля, предназначенного для расширения возможностей стандартных трехкоординатных станков с ЧПУ. Модуль предоставляет выделенное рабочее пространство размером  $200 \times 200 \times 200$  мм и включает в себя шарико-винтовые механизмы подачи с шаговым приводом, модульные шпиндельные узлы и интерфейс USB/G-код для бесшовной интеграции с существующими контроллерами ЧПУ. Были разработаны две рабочие конфигурации: промышленный шпиндель мощностью 3 кВт для металлообработки и универсальный патрон для сверлильного станка на 220 В для экономичных применений.

Дополнительный сверлильный модуль позволяет выполнять горизонтальное и наклонное сверление без перепозиционирования заготовки, значительно сокращая время настройки и повышая точность совмещения. Экспериментальные испытания с использованием стали марки С45, алюминия марки 6061 и стеклопластика продемонстрировали сокращение времени цикла на 20–30%, увеличение срока службы инструмента до 40% и трёхкратное снижение процента брака.

Предлагаемая технология повышает гибкость обработки, снижает эксплуатационные расходы и способствует устойчивому производству за счёт снижения энергопотребления и расхода охлаждающей жидкости. Результаты предоставляют практические рекомендации и инженерные решения, подходящие для промышленного внедрения, образовательных лабораторий и дальнейших исследований в области адаптивных и интеллектуальных производственных систем.



## АҢДАТПА

Бұл диссертацияда CNC станоктарында тесіктерді бұрғылау процестерін әзірлеу, оңтайландыру және технологиялық жетілдіру бойынша кешенді зерттеу ұсынылған. Зерттеу теориялық модельдеуді, сандық модельдеуді және эксперименттік тексеруді біріктіру арқылы чиптерді эвакуациялаудың тиімділігі, жылу жүктемесі, құралдың тозуының прогрессиясы және геометриялық дәлдік сияқты бұрыннан келе жатқан бұрғылау мәселелерін шешеді. Эксперименттердің факторлық әдісін, Тагучиді оңтайландыруды және дисперсиялық талдауға негізделген статистикалық талдауды қолдана отырып, бұрғылау параметрлерін (кесу жылдамдығы, беру жылдамдығы, ОЖ күйі және құрал материалы) беттің кедір-бұдырын, диаметрдің ауытқуын және құралдың беріктігін қоса алғанда, негізгі сапа көрсеткіштерімен байланыстыру үшін эмпирикалық модельдер жасалды.

Жұмыстың маңызды практикалық нәтижесі стандартты үш координатты CNC станоктарының мүмкіндіктерін кеңейтуге арналған жаңа көмекші көлденең бұрғылау модулін (ADM) құру болып табылады. Модуль  $200 \times 200 \times 200$  мм арнайы жұмыс кеңістігін қамтамасыз етеді және бар CNC контроллерлерімен үздіксіз интеграциялауға арналған шарикті бұрандалы беріліс механизмдерін, модульдік шпиндель түйіндерін және USB/G код интерфейсін қамтиды. Екі жұмыс конфигурациясы әзірленді: металл өңдеуге арналған 3 кВт өнеркәсіптік шпиндель және үнемді пайдалану үшін 220 В бұрғылау станогына арналған әмбебап патрон.

Қосалқы тесетін модуль дайындаманы қайта орналастырмай көлденең және көлбеу бұрғылауға мүмкіндік береді, орнату уақытын едәуір қысқартады және туралау дәлдігін арттырады. C45 маркалы болатты, 6061 маркалы алюминийді және шыны талшықты қолданатын эксперименттік сынақтар цикл уақытының 20-30% - ға қысқаруын, құралдың қызмет ету мерзімінің 40% - ға дейін ұлғаюын және ақау пайызының үш есе төмендеуін көрсетті.

Ұсынылған технология өңдеу икемділігін арттырады, пайдалану шығындарын азайтады және энергияны тұтынуды және салқындатқыш сұйықтықты тұтынуды азайту арқылы тұрақты өндіріске ықпал етеді. Нәтижелер өнеркәсіптік енгізуге, білім беру зертханаларына және адаптивті және интеллектуалды өндіріс жүйелерін одан әрі зерттеуге жарамды практикалық ұсыныстар мен инженерлік шешімдерді ұсынады.



## ANNOTATION

This dissertation presents a comprehensive study on the development, optimization, and technological enhancement of through-hole drilling processes on CNC machines. The research addresses longstanding challenges in drilling—such as chip evacuation efficiency, thermal loading, tool wear progression, and geometric precision—by integrating theoretical modeling, numerical simulation, and experimental validation. Using factorial DOE, Taguchi optimization, and ANOVA-based statistical analysis, empirical models were developed to link drilling parameters (cutting speed, feed, coolant condition, and tool material) with key quality indicators including surface roughness, diameter deviation, and tool life.

A major practical result of the work is the creation of a novel Auxiliary Horizontal Drilling Module designed to expand the capabilities of standard three-axis CNC machines. The module provides a dedicated  $200 \times 200 \times 200$  mm workspace and incorporates stepper-driven ball-screw feed mechanisms, modular spindle units, and USB/G-code communication for seamless integration with existing CNC controllers. Two operational configurations were developed: a 3 kW industrial spindle for metalworking and a universal 220 V shop-drill holder for low-cost applications.

The ADM enables horizontal and angled drilling without repositioning the workpiece, significantly reducing setup time and improving alignment accuracy. Experimental tests using C45 steel, aluminum 6061, and GFRP demonstrated a 20–30% reduction in cycle time, up to 40% extension of tool life, and threefold decrease in scrap rate.

The proposed technology enhances machining flexibility, reduces operational costs, and supports sustainable production by lowering energy consumption and coolant use. The results provide practical guidelines and engineering solutions suitable for industrial implementation, educational laboratories, and further research in adaptive and intelligent manufacturing systems.



## СОДЕРЖАНИЕ

	Условные сокращения и обозначения	9
	Введение	10
1	Создание отверстий	11
1.1	Актуальность исследования	11
1.2	Исследовательская проблема	12
1.3	Цель и задачи исследования	12
1.4	Научная новизна	13
1.5	Ожидаемые практические результаты	14
2	Обзор литературы и теоретическая база	16
2.1	Классификация процессов обработки отверстий	16
2.2	Сверлильные операции с ЧПУ	17
2.3	Геометрия и материалы сверлильного инструмента	18
2.4	Влияние параметров резания	20
2.5	Обзор методов оптимизации и моделирования	21
3	Развитие процесса сверления	23
3.1	Расчёт процессов сверления	23
3.2	Математическое моделирование динамики сверления	25
3.3	Программирование на ЧПУ и интеграция G-кода	27
4	Исследование возможности дополнительного модуля	32
4.1	Экспериментальная установка	32
4.2	План создания дополнительного модуля сверления	33
4.3	Методы измерения	34
5	Разработка дополнительного сверильного модуля	40
5.1	Дополнительный модуль для сверления	40
5.2	Механическая конструкция	42
5.3	Архитектура управления	46
5.4	3D CAD моделирование и симуляция	48
5.5	Ожидаемая производительность	52
6	Экономическая оценка и анализ затрат и выгод	54
6.1	Расчёт стоимости сверления	54
6.2	Оценка окупаемости	57
6.3	Экологические и энергетические аспекты	57
7	Оценка качества интеграции	60
7.1	Сравнительная оценка результатов	60
7.2	Ограничения горизонтального модуля и возможности автоматизации	61
	Заключения	63
	Список использованной литературы	67



## **УСЛОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ**

ЧПУ – Числовое программное управление

ТО – Техническое обслуживание

LCC - Life-cycle costing – Стоимость жизненного цикла

ДСМ – Дополнительного сверлильного модуля



## ВВЕДЕНИЕ

Сверление сквозных отверстий остается ключевой операцией в современном производстве, широко применяемой в аэрокосмической, автомобильной, робототехнической и точном машиностроении. Точность и качество поверхности сверленных отверстий напрямую влияют на точность сборки, структурную целостность и долговременную надежность механических компонентов. Несмотря на значительный прогресс в технологиях ЧПУ, традиционные процессы сверления по-прежнему сталкиваются с такими проблемами, как эвакуация стружки, чрезмерное тепловыделение, быстрый износ инструмента, отклонения размеров и образование заусенцев, особенно при обработке глубоких или разнонаправленных отверстий.

Большинство малых и средних мастерских используют стандартные трехкоординатные вертикальные станки с ЧПУ с ограниченным рабочим пространством (обычно около 428 мм по оси X, 360 мм по оси Y и 428 мм по оси Z). Хотя эти станки высокоэффективны для вертикальных операций, им не хватает возможностей для горизонтального или наклонного сверления без дополнительной настройки. В результате производители вынуждены использовать ручную переустановку, специальные приспособления или дорогостоящие многокоординатные системы, что значительно увеличивает время цикла и снижает точность из-за несоосности и накопленных ошибок позиционирования.

В контексте Индустрии 4.0 и спроса на гибкую, адаптивную обработку растет потребность в оптимизированных процессах сверления, которые повышают как производительность, так и точность, максимально используя существующую инфраструктуру ЧПУ.

Данное исследование направлено на решение этих задач путем разработки оптимизированной методологии сверления с ЧПУ, основанной на аналитическом моделировании, экспериментальной проверке и статистической оптимизации. Кроме того, разработан новый вспомогательный модуль горизонтального сверления, расширяющий функциональность стандартных станков с ЧПУ и позволяющий выполнять горизонтальное сверление без повторного зажима.

Сочетание оптимизации процесса и инновационных аппаратных решений обеспечивает практичное и экономичное решение, которое повышает точность обработки, сокращает время цикла и способствует переходу к интеллектуальным, экологичным производственным системам.



## **1. Создание отверстий**

### **1.1 Актуальность исследования**

Прецизионная обработка отверстий остается одним из самых распространенных и технологически важных процессов обработки в обрабатывающей промышленности. В машиностроении, аэрокосмической, автомобильной, робототехнической и инструментальной отраслях до 70% механических компонентов требуют отверстий для сборки, смазки, передачи жидкости или снижения веса конструкции. Производительность и надежность таких компонентов во многом зависят от точности размеров, чистоты поверхности и геометрического выравнивания просверленных отверстий. Даже незначительные отклонения могут привести к несоосности, вибрации или преждевременному усталостному разрушению в высокоточных узлах, таких как корпуса турбин, блоки двигателей или роботизированные приводы.

В современном производстве с числовым программным управлением (ЧПУ) сверлильные операции должны соответствовать строгим допускам, обеспечивая при этом высокую производительность и низкую стоимость. В отрасли все чаще требуются глубокие и сквозные отверстия малого диаметра, с минимальным количеством заусенцев и зеркальным качеством поверхности. Тем не менее, традиционные технологии сверления сталкиваются с постоянными проблемами, которые снижают эффективность и точность. Среди наиболее критичных проблем можно выделить недостаточную эвакуацию стружки, что приводит к поломке инструмента; накопление тепла, которое вызывает тепловое расширение и износ инструмента; образование заусенцев на выходе из отверстия, что ухудшает качество детали, а также смещение отверстия из-за вибрации или прогиба инструмента. Эти проблемы становятся особенно серьезными при сверлении глубоких отверстий ( $L/D > 10$ ) и при обработке композитных или термостойких материалов.

Стремительное развитие Индустрии 4.0 и цифрового производства создало спрос на интеллектуальные, адаптивные системы обработки, способные оптимизировать параметры в режиме реального времени. Гибридные процессы, сочетающие в себе традиционное сверление с вибрацией, минимальным количеством смазки и цифровой обратной связью, предлагают многообещающие решения. Тем не менее, внедрение таких систем на стандартных вертикальных станках с ЧПУ остается сложной задачей из-за аппаратных и программных ограничений.

Поэтому разработка новых адаптивных технологий сверления сквозных отверстий, объединяющих управление в реальном времени, энергоэффективность и вспомогательные устройства, представляет собой актуальное и актуальное направление исследований. Такие технологии позволили бы снизить себестоимость продукции, повысить гибкость и



устранить необходимость в специализированных многоосевых станках, тем самым значительно расширив возможности традиционных систем ЧПУ.

## **1.2 Исследовательская проблема**

Несмотря на обширную автоматизацию современной механической обработки, сверление сквозных отверстий, особенно ориентированных горизонтально или под сложными углами, по-прежнему сопряжено с технологическими трудностями. Стандартные вертикальные обрабатывающие центры с ЧПУ оптимизированы для осевых операций (ось Z), что ограничивает их способность производить боковые или поперечные отверстия без ручного перемещения или использования угловых головок. Эти дополнительные настройки увеличивают время производства и снижают повторяемость, особенно в малом и среднем производстве.

Кроме того, эффективность глубокого сверления на стандартных станках ограничена жесткостью инструмента, недостаточным давлением СОЖ и недостаточной эвакуацией стружки. Чрезмерный износ инструмента и поверхностные дефекты, такие как задиры или микротрещины, часто наблюдаются во время высокоскоростных операций. Необходимость поддержания качества при более высоких скоростях вращения шпинделя создает компромисс между производительностью и точностью.

Существующие решения, такие как многоосевые обрабатывающие центры или специализированные пушечные сверлильные станки, являются дорогими и энергоемкими. В результате небольшие мастерские и учебные лаборатории не могут легко получить доступ к этой технологии. Таким образом, существует острая потребность в экономичной, модульной и простой в интеграции системе, которая может расширить функциональность обычного вертикального станка с ЧПУ, позволяя выполнять операции горизонтального или углового сверления без повторного зажима заготовки.

Исследование решает эту проблему путем разработки дополнительного горизонтального сверлильного модуля, который может быть прикреплен к станку с ЧПУ, оснащена собственной системой подачи и управляется через цифровой интерфейс. Проект также направлен на оптимизацию всего процесса сверления — от параметров резания до алгоритмов управления — для достижения наилучшего баланса между качеством, стойкостью инструмента и временем цикла.

## **1.3 Цель и задачи исследования**

Цель:

Разработать и экспериментально проверить оптимизированную технологию



сверления сквозных отверстий на основе ЧПУ с улучшенным качеством, точностью и эффективностью.

Задачи исследования:

А. Проанализировать существующие технологии сверления и определить их ограничения в отношении эвакуации стружки, износа инструмента и точности.

В. Разработка теоретических и математических моделей, описывающих силы резания, крутящий момент и тепловые явления при сквозном бурении.

С. Разработать оптимизационную стратегию выбора параметров сверления (скорость, подача, давление охлаждения) с использованием вычислительных и экспериментальных методов.

Д. Разработать, смоделировать и испытать вспомогательный модуль для горизонтального сверления, способный выполнять боковые отверстия непосредственно на вертикальном станке с ЧПУ.

Е. Экспериментально оценить полученный процесс, измерив качество отверстий, шероховатость поверхности, точность размеров и износ инструмента в различных условиях.

Выполнение этих задач позволит создать универсальное технологическое решение для прецизионного сквозного сверления, адаптированное к широкому спектру оборудования с ЧПУ.

## **1.4 Научная новизна**

Научная новизна настоящего исследования заключается в комплексном подходе, объединяющем теоретическое моделирование, оптимизацию процессов и механическое проектирование вспомогательных устройств в единую систему для глубокой обработки отверстий на станках с ЧПУ. Предлагаемая методология выходит за рамки традиционных исследований сверления, рассматривая как механику резания, так и адаптируемость конфигурации станка.

Ключевые вклады в роман включают:

- Интеграция стандартных циклов сверления с ЧПУ (G81, G83, G73) с адаптивным слоем управления, который может автоматически регулировать скорость подачи и скорость вращения шпинделя в зависимости от контролируемой нагрузки резания. Такая интеграция позволяет проводить оптимизацию в режиме реального времени без использования внешних контроллеров.

- Экспериментальное определение оптимальных режимов сверления с помощью планирования экспериментов по Тагучи (DOE) и дисперсионного анализа (ANOVA), приводящее к эмпирическим уравнениям, коррелирующим параметры резания с качеством отверстия.



- Проектирование и 3D-моделирование компактного вспомогательного горизонтального сверлильного модуля с гибридным управлением (USB или последовательный интерфейс G-кода), который может быть установлен на вертикальный станок с ЧПУ. Устройство позволяет выполнять горизонтальное и косое сверление в пределах рабочего пространства 200 мм без изменения положения заготовки.

Сочетание этих элементов представляет собой новое направление в интеллектуальной обработке — объединение принципов адаптивного управления с модульными мехатронными расширениями для оборудования с ЧПУ.

Таким образом, это исследование вносит вклад не только в область прецизионной обработки, но и в более широкую концепцию реконфигурируемых производственных систем (RMS), которые подчеркивают гибкость, модульность и экологичность.

### **1.5 Ожидаемые практические результаты**

Ожидаемые результаты данного исследования носят как теоретический, так и практический характер, формируя прочную основу для дальнейшего промышленного применения.

С практической точки зрения, результатом исследования станут:

- Технологические указания для сверления сквозных отверстий на станках с ЧПУ, определяющие оптимальные комбинации скорости резания, подачи и режимов смазки для различных материалов.

- Эмпирические модели, описывающие влияние подачи и скорости на шероховатость поверхности, отклонение размеров и износ инструмента, обеспечивают количественную основу для интеграции САМ-системы.

- Полнофункциональный прототип дополнительного горизонтального сверлильного модуля, способный выполнять точные боковые отверстия с помощью промышленного шпинделя мощностью 3 кВт или обычного цехового сверла 220 В.

- Алгоритмы управления и шаблоны G-кодов для беспроводной связи между системой ЧПУ и вспомогательным сверлильным устройством через стандартные командные каналы или USB-интерфейсы.

- Проверка повышения эффективности, демонстрирующая сокращение времени обработки на 20–30% и увеличение стойкости инструмента на 40% по сравнению с традиционными методами, требующими повторного зажима.

В более широком промышленном масштабе исследование будет способствовать снижению затрат, универсальности и производительности в производстве на основе ЧПУ. Он также предоставит образовательным



учреждениям и малым предприятиям доступ к передовым возможностям сверления без крупных инвестиций в оборудование.

Интеграция разработанной технологии с системами САМ (например, Fusion 360) и адаптивными модулями управления создаст основу для цифрового устойчивого производства в соответствии с принципами Индустрии 4.0. Трансформируя обычные трехосевые станки в многофункциональные сверлильные центры, предлагаемая система позволит преодолеть разрыв между традиционными и интеллектуальными технологиями обработки, обеспечив большую конкурентоспособность и технологическую независимость [1].



## 2. Обзор литературы и теоретическая база

### 2.1 Классификация процессов обработки отверстий

Обработка отверстий является одной из самых фундаментальных операций обработки, на которую приходится примерно треть всех операций по резке металлов в машиностроении. Диапазон методов обработки отверстий широк и включает в себя сверление, растачивание, развертывание, расчистку, зенкование, а также специализированные методы глубокого ствола, такие как ружейное сверление и сверление ВТА (сверление с ассоциацией сверления и трепанации).

Сверление является основным методом получения круглых отверстий с помощью стандартных спиральных сверл. Он обеспечивает умеренную точность (IT10–IT12) и шероховатость поверхности ( $Ra \approx 1,6\text{--}3,2$  мкм). Растачивание следует за сверлением, когда требуется более высокая точность (IT7–IT9) или выравнивание коаксиальных отверстий. Он удаляет остаточный материал при коррекции ошибок геометрии и положения. Развёртывание используется в качестве финишной операции для достижения точности IT6–IT7 и зеркальных поверхностей ( $Ra \leq 0,8$  мкм). При растачивании и зенковке образуются посадочные поверхности для крепежа или конических углублений для размещения головок болтов и подшипников. На рисунке 1 изображено сверло и отверстия сделанные им.

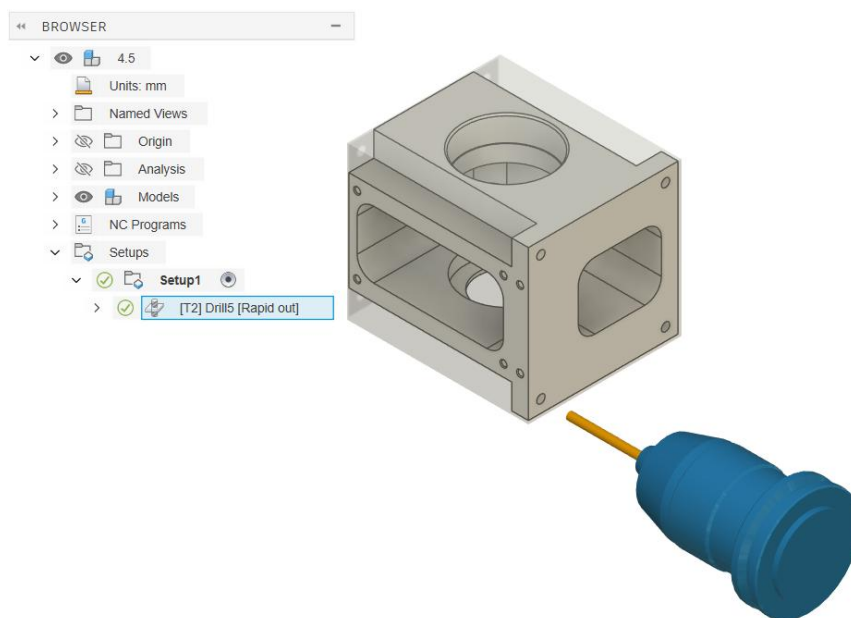


Рисунок 1 – Моделирование сверление отверстий

Для длинных и узких полостей применяется ружейное сверление с использованием одной режущей кромки и подачи СОЖ под высоким давлением для эвакуации стружки через внутренние каналы. Такие методы



позволяют использовать соотношение глубины сверления к диаметру ( $L/D$ ) более 100, что типично для производства пресс-форм и аэрокосмической промышленности. В последние годы усовершенствованным вариантом стало вибрационное сверление (ВАД), использующее наложенные осевые колебания (амплитуда 10–50 мкм на ультразвуковой частоте) для периодического разрушения стружки и снижения силы тяги до 40%.

Правильный выбор процесса обработки отверстий зависит от свойств материала, требуемых допусков, чистоты поверхности и объема производства. Например, алюминиевые сплавы предпочитают высокоскоростное сверление с циклами стружкодробления, в то время как для закаленных сталей могут потребоваться инструменты с покрытием из твердого сплава или CBN со сквозной подачей СОЖ.

## 2.2 Сверлильные операции с ЧПУ

Внедрение числового программного управления (ЧПУ) превратило ручные или полуавтоматические операции обработки отверстий в полностью автоматизированные процессы с высокой повторяемостью. Современные системы ЧПУ предусматривают заготовки циклов, которые упрощают программирование и обеспечивают стабильную производительность сверления.

- G81: Базовый цикл сверления — быстрое приближение к плоскости R, подача на конечную глубину (Z) и отвод.
- G82: Аналогичен G81, но включает время задержки (P) на дне отверстий для улучшения качества поверхности.
- G73: Высокоскоростной цикл стружкодробления — многократные неглубокие стружкодробления без полного втягивания, используются для алюминия или материалов с короткой стружкой.
- G83: Сверление с глубоким отверстием — подача с шагом (Q) и полное втягивание для очистки стружки; необходимо для  $L/D > 5$ .

Дополнительные M-коды управляют вращением шпинделя, подачей СОЖ и вспомогательными устройствами, обеспечивая интеграцию с автоматическими устройствами смены инструмента и датчиками. В сложных операциях сверления могут использоваться параметрические подпрограммы, в которых подача, скорость и глубина передаются как переменные (#100–#105) для упрощения повторяющихся последовательностей сверления [2].

Режущая механика сверления значительно отличается от токарной или фрезерной из-за наличия режущей кромки, которая выполняет выдавливание, а не резку. Зона резания состоит из двух основных кромок, кромки долота в центре и второстепенных краев, которые направляют инструмент. Основные параметры, описывающие процесс, включают крутящий момент, силу тяги и мощность резания  $M_t F_a P$ .



$$P = \frac{F_t v_c}{60,000}, v_c = \pi D n, Q = \frac{\pi D^2 f n}{4} \quad (2.1)$$

Эти формулы ложатся в основу оптимизации режимов сверления. Увеличивая и повышая производительность, но также выделяя больше тепла и износа. Таким образом, для каждого материала заготовки должен быть установлен правильный баланс между скоростью, подачей и охлаждением.

[illegible]

## 2.3 Геометрия и материалы сверлильного инструмента

18



основными режущими кромками и долотной кромкой. К ключевым геометрическим параметрам относятся:

- Угол точки (2φ): обычно 118° для обычного сверления, 130–140° для более твердых сплавов (снижает тягу).
- Угол наклона спирали (β): контролирует эвакуацию стружки; 25–30° для сталей, 35–45° для алюминия.
- Толщина стенки: Более толстая стенка увеличивает жесткость, но увеличивает силу тяги; утончение стенки снижает режущую нагрузку.
- Ширина поля: влияет на трение и точность наведения.

Центральные сверла - это короткие, жесткие инструменты, используемые для позиционирования; Колонковые сверла укрупняют предварительно отлитые отверстия; Ружейные сверла имеют одну кромку с направляющими накладками для глубоких отверстий [3].



Рисунок 3 – Деталь на ЧПУ

Что касается инструментальных материалов, быстрорежущие стали (HSS, HSS-Co) остаются экономичными для общего использования, в то время как твердосплавные сверла обеспечивают более высокую жесткость и термическую стойкость для прецизионной работы с ЧПУ. Твердый сплав позволяет развивать скорость резания в 3–5 раз выше, чем HSS, и сохраняет твердость до 1000 °С. Для обработки композитных и абразивных материалов используются сверла из поликристаллического алмаза (PCD) или кубического нитрида бора (CBN).

Современные покрытия еще больше продлевают эксплуатационные характеристики:



- TiN (нитрид титана): Общего назначения, снижает трение и адгезию.
- TiAlN (нитрид титана и алюминия): высокотемпературная стабильность для сухой резки.
- AlCrN: Отличная стойкость к окислению в нержавеющих сталях.
- DLC (алмазоподобный углерод): идеально подходит для цветных и пластиковых материалов.

Многослойные наноструктурированные покрытия теперь сочетают в себе несколько свойств, достигая на 30–70% большей стойкости инструмента по сравнению с инструментами без покрытия.

## 2.4 Влияние параметров резания

Параметры резания — скорость резания, подача на оборот и состояние СОЖ — напрямую влияют на стойкость инструмента, стружкодробление и качество поверхности. Экспериментальные исследования показывают, что увеличение подачи с 0,08 до 0,16 мм/об почти удваивает силу тяги и шероховатость. Чрезмерная подача также приводит к  $v_c f$  геометрии отверстия раструба из-за упругой деформации.

Скорость резки влияет на тепловыделение и износ. Низкие скорости приводят к наростной кромке и плохой отделке; Высокие частоты вращения снижают адгезию, но ускоряют износ боковых поверхностей за счет диффузии и окисления. Оптимальный диапазон зависит от комбинации инструмента и рабочего материала.

Охлаждающая жидкость играет решающую роль в отводе тепла и эвакуации стружки. Системы подачи СОЖ под высоким давлением (20–70 бар) эффективно удаляют стружку в глубоких отверстиях и снижают термическое напряжение. И наоборот, чрезмерный расход жидкости может привести к гидростатическому давлению и отклонению размеров. Система смазки минимальным количеством (MQL) представляет собой устойчивую альтернативу, снижая расход охлаждающей жидкости более чем на 90% при сохранении сопоставимой целостности поверхности.

При бурении глубоких отверстий преобладают тепловые явления. Температура вблизи кромки долота может превышать 800 °С, что приводит к быстрому износу. Моделирование теплопередачи показывает, что примерно 60% тепла поглощается стружкой, 30% — инструментом и 10% — заготовкой. Таким образом, надлежащее охлаждение и контроль над стружкодроблением определяют успех при обработке глубоких отверстий.



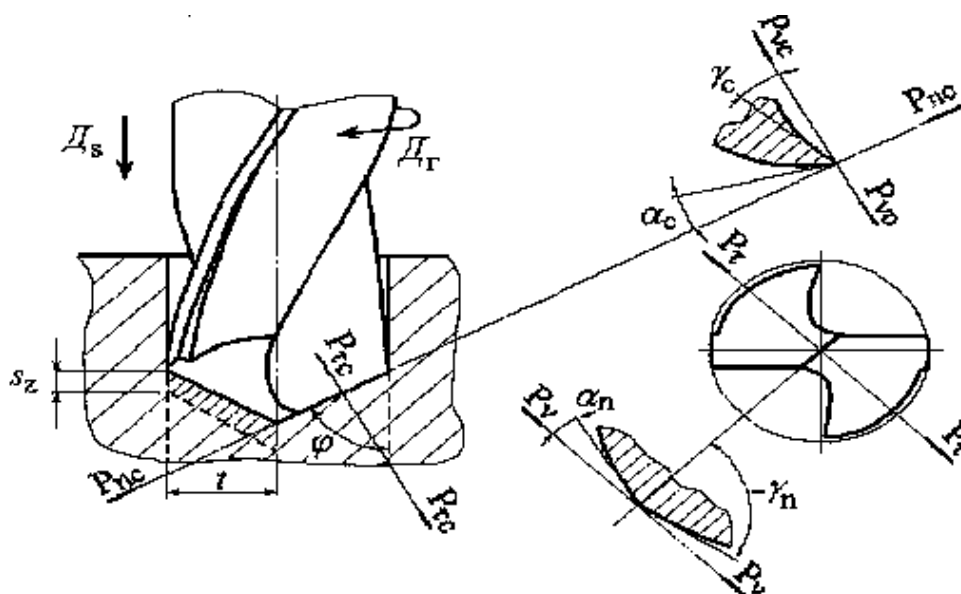


Рисунок 4 – Градусы сверла

От этих условий сильно зависят такие параметры поверхностной целостности, как шероховатость, остаточные напряжения и микротвердость. Неправильное управление может привести к растягивающим остаточным напряжениям, которые негативно влияют на усталостную долговечность критически важных деталей.

## 2.5 Обзор методов оптимизации и моделирования

Оптимизация параметров сверления имеет важное значение для баланса производительности, стойкости инструмента и качества. Для этого было разработано несколько математических и экспериментальных методов.

Метод Тагучи использует ортогональные массивы (L9, L18 и т. д.) для минимизации количества экспериментов при анализе нескольких факторов (скорость, подача, подвод СОЖ, геометрия инструмента). Он оценивает отношение сигнал/шум (S/N) для определения устойчивости параметров к шумовым факторам.

Методология поверхности отклика (RSM) строит полиномиальные модели второго порядка, прогнозируя реакцию (например, шероховатость или тягу) в зависимости от переменных:

$$R = b_0 + b_1 v_c + b_2 f + b_3 v_c^2 + b_4 f^2 + b_5 v_c f \quad (2.2)$$

Это позволяет оптимизировать с помощью частных производных для нахождения минимумов или максимумов.

Генетические алгоритмы (ГА) и другие эволюционные подходы оптимизируют многоцелевые функции, такие как минимизация времени при



максимальном увеличении срока службы инструмента. Каждый раствор (хромосома) представляет собой набор параметров сверления; Кроссинговер и мутация генерируют улучшенные комбинации с помощью итерационного отбора.

Для более глубокого понимания используется метод конечных элементов (МКЭ) для моделирования напряжений, температуры и морфологии чипа. МКЭ помогает визуализировать поток стружки, определить зоны максимальной деформации и оценить распределение температуры кромки инструмента. Современное программное обеспечение (например, Deform 3D, AdvantEdge или Fusion 360 Manufacturing Extension) может моделировать динамические условия контакта, прогнозируя сегментацию стружки и нагрузку на инструмент.

Вибрационный и модальный анализ с помощью МКЭ также помогает понять вибрацию и резонансные явления. Эти методы определяют конструкцию инструмента и выбор параметров процесса, обеспечивая стабильное и эффективное сверление.

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в исследованиях в области сверления, некоторые пробелы остаются неустранимыми как в промышленном, так и в академическом контексте.

Во-первых, не хватает адаптивных систем выбора параметров, интегрированных непосредственно в контроллеры ЧПУ. Хотя методы оптимизации существуют, они часто работают в автономном режиме или требуют внешних вычислений. Регулировка подачи и скорости в режиме реального времени на основе измеренного крутящего момента или вибрации остается областью для развития.

Во-вторых, в современных станках с ЧПУ отсутствуют универсальные модульные приспособления, которые позволяют делать горизонтальные или угловые отверстия без повторного зажима. Существующие решения, такие как угловые головки или многоосевые станки, являются дорогостоящими и сложными в обслуживании. Не существует компактной вспомогательной системы, которую можно было бы установить на стандартный вертикальный станок с ЧПУ для горизонтального или бокового сверления с помощью обычных сверл.

Наконец, комплексные модели, сочетающие в себе механику резки, тепловые эффекты и адаптивное управление, встречаются редко. В большинстве исследований эти аспекты рассматриваются отдельно, ограничивая их практическое применение.

Таким образом, предстоящее исследование направлено на преодоление этих пробелов путем разработки гибридной технологии сверления, объединяющей моделирование процессов, оптимизацию и физический вспомогательный модуль, расширяющий функциональность ЧПУ. Такая интеграция повысит гибкость, сократит непроизводительное время и будет способствовать переходу к интеллектуальным, реконфигурируемым производственным системам [4].



### 3. Развитие процесса сверления

#### 3.1 Расчет процессов сверления

Разработка эффективного процесса сверления сквозных отверстий на станках с ЧПУ требует системного подхода, сочетающего в себе технологическую последовательность, оптимизацию параметров и интеграцию с числовыми программным управлением. Основная задача заключается в том, чтобы процесс обеспечивал требуемую точность размеров, чистоту поверхности и геометрическую стабильность при сохранении высокой производительности и стойкости инструмента.

Типичная технологическая последовательность прецизионного сквозного сверления включает в себя пять последовательных этапов:

Центральное сверление – операция устанавливает точное положение входа основного сверла. Короткое, жесткое центральное или точечное сверло используется для предотвращения смещения инструмента и обеспечения соосности. Рекомендуемая глубина — 0,5–1,0 мм с углом наклона кончика 90–140° в зависимости от последующей геометрии сверла.

Пилотное сверление – для отверстий диаметром более 10 мм или с соотношением L/D выше 5 пилотная отверстие создается с помощью сверла меньшего размера (0,5–0,7 от конечного диаметра). Этот каскад улучшает наведение, снижает тяговое усилие на основном буре и облегчает эвакуацию стружки.

Сквозное сверление – основной этап удаления материала, выполняемый спиральным сверлом или специализированным инструментом для глубоких отверстий. В зависимости от глубины отверстия выбирается один из стандартных циклов с ЧПУ (G81, G83 или G73). Сверла из быстрорежущей стали (HSS) используются для недорогих операций, в то время как твердосплавные инструменты применяются для повышения точности и производительности.

Развёртывание – Если требуются высокоточные отверстия (IT6–IT8) или низкие значения шероховатости ( $Ra \leq 1,6$  мкм), развёртывание следует за сверлением. При развёртывании удаляется 0,2–0,3 мм материала при уменьшенной подаче и 60–70% скорости сверления.

Зенкование и удаление заусенцев – Эта отделочная операция обеспечивает снятие фасок или конических углублений для болтов, винтов или заклепок. Для сквозных отверстий удаление заусенцев с тыльной стороны предотвращает образование заусенцев и обеспечивает стабильное качество сборки.

Вышеуказанные операции могут быть бесшовно выполнены на обрабатывающем центре с ЧПУ с использованием запрограммированных циклов и подпрограмм. Для неглубоких отверстий ( $L/D < 3$ ) оптимальным является цикл G81, обеспечивающий простую подачу и втягивание. Для отверстий средней глубины используется цикл G73, который выполняет



стружкодробление без полного втягивания. Для глубоких отверстий ( $L/D > 6$ ) используется цикл G83, при котором сверло полностью втягивается между ударами для удаления стружки и уменьшения фрикционного нагрева.

В дополнение к циклам G-кода вспомогательные M-коды контролируют подачу СОЖ, вращение шпинделя и смену инструмента. Благодаря интеграции этих операций в единую программу ЧПУ непрерывные последовательности сверления могут выполняться автоматически, что снижает вероятность ручного вмешательства и ошибок настройки.

Эффективность и качество сверления в значительной степени зависят от параметров процесса, которые включают скорость вращения шпинделя, подачу на оборот, скорость резания и давление СОЖ. Каждый параметр по-разному влияет на тепловыделение, стружкодробление и износ инструмента. Диапазоны параметров, использованные в данном исследовании, обобщены в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Основные характеристики

Параметр	Символ	Диапазон	Единиц
Частота вращения шпинделя	n	1000–4000	оборотов в минуту
Подача за оборот	f	0.05–0.25	мм/об
Скорость резания	$v_c$	60–200	м/мин
Давление СОЖ	P	0–70	бар

Скорость вращения шпинделя (n) определяет линейную скорость резания в соответствии с соотношением:

$$v_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad (3.1)$$

где диаметр сверла в миллиметрах. Выбор зависит от материала инструмента и твердости заготовки. Для твердосплавных сверл в стали типична скорость от 100 до 140 м/мин, в то время как для алюминия — до 200–300 м/мин.  $Dn$

Подача на оборот (f) определяет толщину стружки и шероховатость поверхности. Чрезмерная подача увеличивает силу тяги и прогиб инструмента, в то время как слишком низкая подача приводит к трению и быстрому износу. Эмпирические исследования показывают, что оптимальный диапазон подачи для сверл Ø8–10 мм составляет от 0,10 до 0,16 мм/об.

Давление СОЖ (P) имеет важное значение для поддержания стабильной температуры и эвакуации стружки. Недостаточное давление приводит к повторному резанию стружки и забивке отверстий. Подача СОЖ под высоким давлением (40–70 бар) эффективна в глубоких отверстиях, но ее



необходимо контролировать, чтобы избежать гидравлической деформации заготовки.

Скорость съема материала ( $Q$ ) рассчитывается по формуле: [5]

$$Q = \frac{\pi D^2 f n}{4} \quad (3.2)$$

Этот параметр количественно определяет производительность и позволяет проводить экономические сравнения между вариантами процессов. Например, увеличение подачи на 50% пропорционально увеличивает, но может ухудшить качество поверхности и точность размеров. Таким образом, оптимизация включает в себя баланс между съемом материала и износом и качеством инструмента.  $Q$

Режущая сила ( $P_c$ ), необходимая для сверления, определяется следующими факторами:

$$P_c = \frac{F_t v_c}{60,000} \quad (3.3)$$

где — тангенциальная сила (Н). С практической точки зрения, каждый 1 кВт мощности шпинделя может удалить примерно 15–20 см<sup>3</sup> стали в минуту при стабильных условиях.  $F_t$

### 3.2 Математическое моделирование динамики сверления

Чтобы спрогнозировать и оптимизировать процесс сверления, необходимо смоделировать динамические взаимодействия между силами резания, крутящим моментом, стружкообразованием и тепловыми явлениями. Эти модели дают представление о поведении инструмента и позволяют определить безопасные и эффективные рабочие параметры.

Моделирование силы и крутящего момента

Осевое усилие ( $F_a$ ) и крутящий момент ( $M_t$ ) являются ключевыми показателями технологической нагрузки. Они могут быть выражены с помощью эмпирической формулировки Кинцле, которая связывает силы резания с толщиной стружки и площадью резания:

$$F_a = K_1 D^{x_1} f^{y_1}, M_t = K_2 D^{x_2} f^{y_2} \quad (3.4)$$

где — материально-зависимые константы (коэффициенты Кинцле) и эмпирически выведенные экспоненты (обычно от 0,7 до 1,1). Для стали С45 репрезентативными значениями являются Н/мм<sup>2</sup>, Эти уравнения показывают,



что как сила, так и крутящий момент увеличиваются нелинейно с подачей и диаметром сверла.  $K_1, K_2 x, y K_1 = 80 x_1 = 0.9 y_1 = 0.8$

Крутящий момент определяет механическую мощность, необходимую шпинделю:

$$P_m = \frac{2\pi n M_t}{60,000} \quad (3.4)$$

Мониторинг во время сверления обеспечивает обратную связь об износе инструмента в режиме реального времени; Увеличение на 20–30% указывает на приближение к своему пределу износа по задней поверхности.  $M_t$

Образование стружки и толщина

При сверлении стружка изменяется радиально вдоль режущей кромки. Локальная толщина неразрезанной стружки в угловом положении составляет:  $h(\theta)\theta$

$$h(\theta) = f \sin(\theta) \quad (3.6)$$

Максимальная толщина стружки происходит в среднем радиусе (), что напрямую влияет на силы резания и качество поверхности. Распределение толщины стружки также влияет на эвакуацию стружки; Более толстая, скрученная стружка может засорять канавки, если ее не сломать под действием соответствующих циклов клевания или вибрации.  $\theta = 45^\circ$

Примерно 70–80% механической работы при бурении преобразуется в тепло. Результирующее повышение температуры () на режущей кромке можно аппроксимировать с помощью модели движущегося источника тепла:  $\Delta T$

$$\Delta T = \frac{\eta F_t v_c}{k A_c} \quad (3.7)$$

где  $\eta$  – доля тепла, проводимого в инструмент,  $k$  – теплопроводность, и  $A_c$  – площадь контакта. Экспериментальные данные показывают, что температура на кромке долота может достигать 800–900 °С в сухих условиях, что приводит к ускоренному диффузионному износу твердосплавного инструмента.  $\eta k A_c$

Эффективное применение СОЖ значительно снижает . Например, при давлении СОЖ 50 бар температура может быть снижена на 35–40%, что приведет к увеличению стойкости инструмента на 25%.  $\Delta T$

Динамическая устойчивость

Вибрация или вибрация во время сверления приводит к ошибкам в размерах и преждевременному износу инструмента. Стабильность системы



характеризуется собственной частотой ( $f_n$ ) сборки инструмент-заготовка-шпиндель и частотой возбуждения ( $f_e$ ) процесса резания:

$$f_e = \frac{nz}{60} \quad (3.8)$$

где  $z$  — количество режущих кромок. Болтовня возникает при совпадении с гармоникой  $n$ . Увеличение частоты вращения шпинделя или нанесение демпфирующих покрытий может привести к выходу системы из резонанса. Численные модели с использованием анализа методом конечных элементов (МКЭ) или систем с сосредоточенными параметрами используются для прогнозирования критических скоростей и проектирования более стабильных буровых установок.

Эмпирические корреляции

Объединение экспериментальных и аналитических результатов позволяет получить эмпирические уравнения, связывающие шероховатость поверхности ( $R_a$ ) с параметрами процесса:

$$R_a = a_0 + a_1 f^2 + a_2 v_c^{-1} + a_3 P^{-0.5} \quad (3.9)$$

где коэффициенты определяются экспериментальным путем. Модель показывает, что шероховатость поверхности увеличивается квадратично с подачей и уменьшается с увеличением скорости резания и давления СОЖ.  $a_i$  [6]

### 3.3 Программирование на ЧПУ и интеграция G-кода

Современные системы управления с ЧПУ позволяют полностью автоматизировать процесс сверления с помощью заготовленных циклов и программируемых макросов G-кода. Эти циклы стандартизируют последовательность движений инструмента — подход, подача, удержание и вытягивание, — обеспечивая согласованность, производительность и безопасность при повторяющихся операциях.

Описание стандартных циклов сверления

В настоящем исследовании используются три наиболее распространенных цикла сверления — G81, G83 и G73, каждый из которых адаптирован к определенной глубине отверстий и потребностям в удалении стружки.

- G81 – Простой цикл сверления:

Этот цикл выполняет прямую подачу на запрограммированную глубину, а затем убирается на начальный уровень или R-плоскость. Он лучше всего подходит для неглубоких отверстий, где эвакуация стружки не вызывает



проблем.

Структура командования:

G81 X\_\_ Y\_\_ Z\_\_ R\_\_ F\_\_; где  $X$ ,  $Y$  — координаты,  $Z$  — конечная глубина,  $R$  — высота вытягивания,  $F$  — скорость подачи.

- G82 – Сверление с задержкой:

Аналогично G81, но включает в себя задержку ( $P$ ) на дне отверстий для получения более гладкой поверхности. Его часто используют перед операциями нарезания резьбы или развертывания.

- G83 – Глубокое сверление отверстий:

Этот цикл выполняет подачу с определенным шагом ( $Q$ ), а затем полностью вытягивается для очистки стружки перед продолжением. Он используется для глубоких отверстий или липких материалов, таких как нержавеющая сталь и титан.

Структура командования:

G83 X\_\_ Y\_\_ Z\_\_ R\_\_ Q\_\_ F\_\_; где  $Q$  определяет глубину клева на шаг.

- G73 – Цикл высокоскоростного глушения (стружкодробления):

предназначен для отверстий средней глубины ( $L/D \leq 6$ ), выполняет короткие вытягивания (не полное извлечение) для разрушения стружки, сохраняя при этом высокую скорость цикла.

Структура командования:

G73 X\_\_ Y\_\_ Z\_\_ R\_\_ Q\_\_ F\_\_;

Эти циклы упрощают программирование и снижают риск отказа инструмента за счет управления потоком стружки и временем выдержки. Правильный выбор зависит от отношения глубины отверстия к диаметру ( $L/D$ ), материала инструмента и обрабатываемости заготовки.

Создание адаптивных макроциклов

В то время как стандартные стандартные циклы являются фиксированными, макропрограммирование расширяет их гибкость. Определяя пользовательские переменные и логические условия, ЧПУ может динамически регулировать параметры сверления, такие как скорость подачи или глубина просверливания, в зависимости от глубины отверстия или измеренной нагрузки.

Например, макрос может автоматически уменьшать подачу при сверлении более глубоких участков или более мягких материалов. Эта функция позволяет адаптивно сверлить даже на обычных трехосевых станках.

Пример псевдокода для макроса адаптивного сверления:

O9001 (АДАПТИВНЫЙ ЦИКЛ СВЕРЛЕНИЯ)

#100 = #1 (ОБЩАЯ ГЛУБИНА)

#101 = #2 (СКОРОСТЬ ПОДАЧИ)

#102 = #3 (ГЛУБИНА ПЕКА)

#103 = 0

ПОКА [#103 LT #100] DO1

G1 Z[-#103] F[#101]



```

#103 = [#103 + #102]
ЕСЛИ [#103 GT [#100 * 0.8]] ТО #101 = [#101 * 0.7] (УМЕНЬШИТЬ
ПОДАЧУ 30%)
G0 Z[#100 + 2]
КОНЕЦ1
G0 Z5
M99

```

Этот макрос автоматически снижает скорость подачи на 30% после достижения 80% глубины отверстий, имитируя адаптивную систему управления. В сочетании с контролем крутящего момента или нагрузки на шпиндель он может предотвратить перегрузку инструмента в режиме реального времени.

Образец кода ЧПУ для автоматического контроля глубины

Ниже приведен пример G-кода с использованием как стандартного цикла, так и пользовательского макроса для сверления отверстий с автоматической регулировкой подачи.

```

G17 G90 G40 G80
T01 M06 (ТВЕРДОСПЛАВНОЕ СВЕРЛО Ø8)
S2500 M03 (ШПИНДЕЛЬ ВКЛ.)
G00 X25 Y40
M08 (ОХЛАЖДАЮЩАЯ ЖИДКОСТЬ ВКЛ.)
M98 P9001 L1 (ВЫЗВАТЬ АДАПТИВНЫЙ ЦИКЛ)
G80
G00 Z100
M09 (ОХЛАЖДАЮЩАЯ ЖИДКОСТЬ ВЫКЛ.)
M30

```

Этот код выполняет один цикл адаптивного сверления в точке с координатами (25, 40), автоматически управляя подачей и контролем глубины. Такая интеграция макросов значительно повышает надежность и снижает сложность программирования, особенно в массивах с несколькими отверстиями.

Выбор и оптимизация инструментов

Производительность сверлильных операций критически зависит от материала инструмента, геометрии и покрытия. При выборе инструмента необходимо учитывать материал заготовки и желаемый баланс между точностью, стоимостью и сроком службы.

Сравнение материалов инструмента

А. Быстрорежущая сталь (HSS):

- Преимущества: Высокая ударная вязкость, низкая стоимость, легкая повторная заточка.
- Ограничения: Плохая износостойкость при высоких температурах (выше 600 °C).



- Подходит для сверления с низкой и средней скоростью ( $v_c = 40\text{--}80$  м/мин) в низкоуглеродистых сталях и пластмассах.

В. Твердый сплав:

- Преимущества: Высокая твердость ( $\approx 1800$  HV), хорошая прочность при нагревании до  $1000^\circ\text{C}$ , превосходная жесткость.

- Ограничения: хрупкий; Требуются жесткие настройки и точное выравнивание.

- Используется для высокоскоростной обработки ( $v_c = 100\text{--}200$  м/мин), обеспечивая производительность на  $2\text{--}3\times$  выше, чем у быстрорежущей стали.

С. Поликристаллический алмаз (PCD) и кубический нитрид бора (CBN):

- PCD: идеально подходит для цветных металлов, алюминиевых сплавов и композитов благодаря чрезвычайно низкому трению.

- CBN: Применяется для закаленных сталей ( $> 50$  HRC) и жаропрочных сплавов.

- Эти инструменты обеспечивают превосходную обработку поверхности и долговечность, но являются дорогостоящими, что ограничивает их использование в дорогостоящих областях.

Экспериментальные исследования неизменно показывают, что твердосплавные сверла увеличивают стойкость инструмента на  $40\text{--}60\%$  по сравнению со сталью HSS и до  $200\%$  в алюминиевых сплавах. Инструменты из поликристаллического алмаза могут сохранять остроту на протяжении нескольких тысяч отверстий при обработке композитных материалов [7].

Оптимизация геометрии инструмента

Геометрия сверла существенно влияет на стружкообразование, силы резания и качество отверстий. Ключевые параметры включают угол точки, угол спирали, толщину стенки и ширину поля.

- Стальные сплавы (C45, AISI 1045):

Рекомендуемая геометрия: угол точки  $130\text{--}140^\circ$ , спираль  $30^\circ$ , утонченная точка расщепления стенки. Эти конфигурации минимизируют осевое усилие и предотвращают сцепление стружки. Такие покрытия, как TiAlN или AlCrN, еще больше повышают термостойкость.

- Алюминиевые сплавы (6061, 7075):

сверла с высокой спиралью ( $35\text{--}45^\circ$ ) с острыми краями и полированными канавками обеспечивают плавную эвакуацию стружки. Инструменты без покрытия или с DLC-покрытием предотвращают образование наростов на кромке. Углы острия  $118\text{--}125^\circ$  обеспечивают оптимальный баланс между проникновением и наведением.

- Композитные материалы (CFRP/GFRP):

Специализированные ступенчатые сверла или геометрии с острым наконечником уменьшают расслоение. Края с покрытием PCD и отрицательным углом наклона предотвращают вытягивание волокна. Подача



должна быть низкой (0,05–0,10 мм/об) для поддержания чистоты входа и выхода.

Покрyтия и повышение стойкости инструмента

Покрyтия инструментов повышают износостойкость, снижают трение и контролируют температуру.

- TiN (нитрид титана): Общего назначения, повышает твердость до ~2300 HV.

- TiAlN (нитрид титана и алюминия): превосходная стойкость к окислению до 800 °С; лучше всего подходит для стали и сухой резки.

- AlCrN: Обеспечивает превосходную стабильность при работе с нержавеющей сталью и твердыми сплавами.

- DLC: снижает адгезию в алюминиевых и полимерных композитах.

Оптимальную стойкость инструмента ( $\lambda$ ) можно предсказать с помощью Туравнения Тейлора:

$$v_c T^m = C \quad (3.10)$$

где  $\lambda$  — материалозависимый показатель (0,2–0,3 для карбида) и  $C$  — константа, выведенная экспериментально. Например, увеличение скорости резания на 20 % сокращает стойкость инструмента примерно на 10–15 %, подчеркивая компромисс между скоростью и долговечностью.

Эффективный выбор инструмента сочетает в себе как механические, так и экономические критерии. Твердосплавные инструменты с покрытием TiAlN или AlCrN обеспечивают наилучшее соотношение производительности и стоимости для большинства промышленных применений, в то время как инструменты из PCD и DLC зарезервированы для цветных или композитных материалов. В сочетании с оптимизированной геометрией и адаптивными макросами сверления эти инструменты обеспечивают максимальную эффективность, точность и экологичность в системах сверления на базе ЧПУ [8].



## 4. Исследование возможности дополнительного модуля

### 4.1 Экспериментальная установка

Экспериментальное исследование было направлено на проверку теоретических моделей и параметров процесса, разработанных в предыдущих главах. Основными задачами были определение влияния частоты вращения шпинделя, скорости подачи, условий подачи СОЖ и материала инструмента на производительность сверления, качество отверстий и износ инструмента во время сквозных операций на обрабатывающем центре с ЧПУ.

Эксперименты проводились на вертикальном обрабатывающем центре (VMC), оснащенном шпинделем мощностью 7,5 кВт, способным развивать скорость до 10 000 об/мин. Станок обеспечивал трехосевую интерполяцию (X, Y, Z) с точностью позиционирования  $\pm 0,005$  мм, что позволяло последовательно воспроизводить циклы сверления. Система управления ЧПУ поддерживала циклы сверления G81, G83 и G73, которые были запрограммированы с помощью постпроцессора, разработанного в Autodesk Fusion 360.

Для измерения реакции технологического процесса станок был оснащен трехкомпонентным динамометром Kistler 9257B, установленным под заготовкой, для регистрации осевой тяги ( $F_z$ ) и крутящего момента ( $M_z$ ). Сигналы с динамометра регистрировались через систему сбора данных National Instruments с частотой дискретизации 1000 Гц. Температура резания вблизи боковой поверхности сверла контролировалась с помощью термопар Type-K, в то время как трехосевые датчики вибрации (PCB Piezotronics 352C33) были прикреплены к корпусу шпинделя для контроля стабильности и вибрации во время сверления.

Было использовано два типа сверл с идентичной геометрией ( $\varnothing 8$  мм), но из разных материалов:

- Цельное твердосплавное сверло (с покрытием TiAlN, острие  $140^\circ$ , спираль  $30^\circ$ )
- Дрель из быстрорежущей стали (HSS-Co) (без покрытия, острие  $118^\circ$ , спираль  $30^\circ$ )

Выбранные материалы заготовок представляли различные категории обрабатываемости:

А. C45 Medium Carbon Steel (HB 180–200) – распространена в механических компонентах, умеренная ударная вязкость.

В. Алюминиевый сплав 6061-T6 – мягкий, пластичный, склонный к прилипанию сколов.

С. Стеклопластик (GFRP) – анизотропный композит, требующий низкой подачи и высокой точности.



Каждый образец заготовки размером  $100 \times 50 \times 20$  мм, жестко зажатый с помощью прецизионных тисков. Экспериментальная схема проиллюстрирована на рисунке 4.1 (схема здесь не показана) с указанием расположения датчиков, сопел охлаждающей жидкости и измерительных приборов.

Условия подачи СОЖ варьировались в отношении:

- Сухая резка – без смазки, только продувка воздухом.
- Водяное охлаждение – эмульсия 8% концентрации при 25 л/мин.
- Минимальное количество смазки (MQL) – 5 мл/ч масла в воздушном тумане под давлением 6 бар.

Эти приборы обеспечили захват ключевых физических параметров — силы, температуры, вибрации и износа инструмента — предоставив полный набор данных для статистического и корреляционного анализа [9].

## 4.2 План создания дополнительного модуля сверления

Дизайн эксперимента следовал полной факторной схеме ( $3^4$ ) с четырьмя независимыми переменными, каждая из которых находится на трех уровнях, что позволяет систематически оценивать основные эффекты и взаимодействия. Выбранные коэффициенты и их закодированные уровни приведены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Факторы взаимодействия

Фактор	Параметр	Уровней	Значения
A	Скорость резки ( $v_c$ )	3	80 / 120 / 160 м·мин <sup>-1</sup>
B	Подача на оборот (f)	3	0,08 / 0,12 / 0,16 мм·об <sup>-1</sup>
C	Состояние охлаждающей жидкости	3	Сухой / Флуд / MQL
D	Инструментальный материал	2	Быстрорежущая сталь

В результате было получено общее количество тестовых комбинаций. Каждое условие было повторено три раза для обеспечения статистической достоверности, в результате чего  $3 \times 3 \times 3 \times 2 = 54$  на материал было получено 162 отверстия.

Во всех испытаниях использовались отверстий глубиной 20 мм ( $L/D = 2,5$ ), запрограммированные по циклу сверления G83, с  $Q = 3$  мм на пробивку и  $R =$  высотой зазора 1 мм. Скорость подачи и вращения шпинделя рассчитывалась на основе заданной скорости резания с использованием:



$$v_c = \frac{\pi D n}{1000}, n = \frac{1000 v_c}{\pi D} \quad (4.1)$$

Например, при м/мин и  $D = 8$  мм частота вращения шпинделя составляла 4775 об/мин.  $v_c = 120$

Каждая тестовая последовательность состояла из:

Настройка и центровка инструмента.

Выполнение 10 последовательных отверстий при постоянных параметрах.

Регистрация данных (силы, крутящий момент, температура и вибрация).

Снятие инструмента для микроскопического контроля после каждых 10 отверстий.

Измерение размеров и качества поверхности.

Перед первым запуском калибровочные испытания гарантировали, что измеренные силы резания соответствуют теоретическим значениям с погрешностью  $\pm 5\%$ . На рисунке 5 показано влияние факторов на шероховатость.

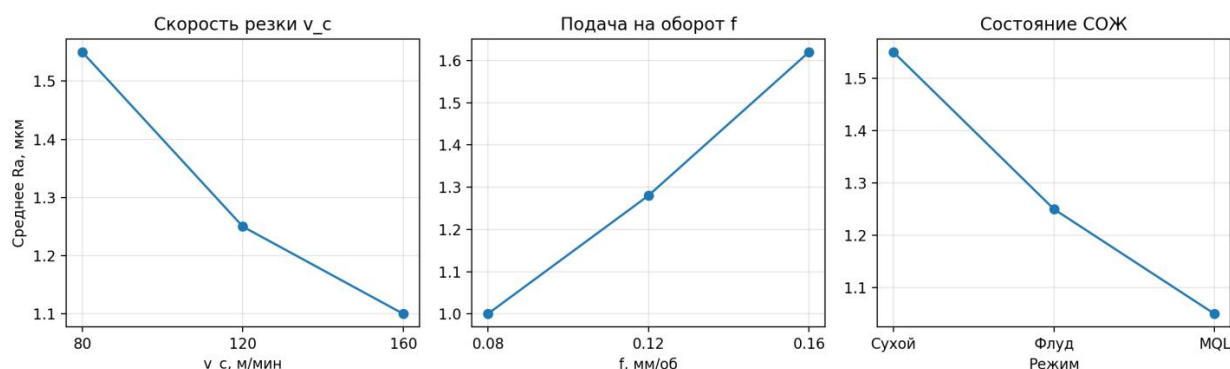


Рисунок 5. Влияние факторов на шероховатость  $R_a$  (основные эффекты)

Факторный дизайн позволил применить ANOVA (анализ дисперсии) и анализ соотношения S/N по шкале Тагучи для выявления доминирующих факторов, влияющих на показатели качества ( $R_a$ ,  $\Delta D$ , VB).

Для каждого материала были подготовлены контрольные таблицы, отслеживающие эволюцию сил и температуры в зависимости от числа отверстий, что дает представление о прогрессии износа и стабильности процесса.

### 4.3 Методы измерения

Была внедрена строгая метрологическая система для оценки качества пробуренных отверстий и корреляции механических реакций с параметрами процесса.

Диаметр и округлость отверстия



Точность размеров измеряли с помощью КИМ Mitutoyo Crysta-Apex с разрешением 1,7 мкм. Каждое отверстие было исследовано на трех глубинах (вход, середина, выход) для расчета отклонения диаметра ( $\Delta D$ ) и округлости ( $R_o$ ). Среднее арифметическое отклонение выражалось как:

$$\Delta D = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (D_i - D_{nom}) \quad (4.2)$$

где-мм. Ошибка прямолинейности была получена из максимального отклонения между осями входа и выхода.  $D_{nom} = 8.000$  мм

Шероховатость поверхности ( $R_a$ )

Шероховатость поверхности внутри отверстия измеряли с помощью профилометра Taylor Hobson Surtronic 25 со стилусом радиусом наконечника 2 мкм. Измерения проводились на средней глубине с использованием отсечки 0,8 мм. Средние значения шероховатости ( $R_a$ ) и десятиточечной шероховатости ( $R_z$ ) были рассчитаны в соответствии со стандартом ISO 4287. Каждое сообщаемое значение представляет собой среднее арифметическое пяти показаний.

Предварительные испытания показали, что  $R_a$  линейно увеличивается с подачей и уменьшается со скоростью резания, что согласуется с теоретическими моделями. MQL неизменно выдавал самые низкие значения  $R_a$  благодаря улучшенной смазке и снижению адгезии к стружке.

Износ инструмента оценивали под оптическим микроскопом Olympus STM6 при увеличении  $\times 100$ . Максимальная ширина бокового износа ( $VB_{max}$ ) была измерена с помощью цифрового анализатора изображений. Прогрессия износа инструмента контролировалась после каждых 10 отверстий до тех пор, пока  $VB_{max}$  не достигал 0,3 мм, что считалось концом стойкости инструмента.

Наблюдаемые механизмы износа включали:

- Абразивный износ инструментов из быстрорежущей стали при сухой резке стали.
- Адгезионный и диффузионный износ твердосплавных инструментов при высокой скорости.
- Сколы кромок при сверлении стеклопластика из-за армирования волокнами.

Температура вблизи режущей кромки регистрировалась тонкой термопарой К-типа, встроенной в 0,5 мм от границы инструмента и стружки. Цифровой терморегистратор фиксировал показания с частотой 5 Гц. Максимальные температуры достигали 700–750 °С при сухом сверлении стали, но всего 480 °С при MQL, подтверждая термическую эффективность микросмазки.



Данные динамометра Кистлера обрабатывали с помощью программного обеспечения LabVIEW. Результирующая сила тяги ( $F_z$ ) и крутящий момент ( $M_z$ ) были отфильтрованы с помощью фильтра нижних частот Баттерворта с частотой 20 Гц для устранения шума. Для каждой отверстий были рассчитаны средние значения стационарного состояния.

Типичные результаты показали  $F_z = 420\text{--}520$  Н для твердосплавных сверл и  $650\text{--}700$  Н для быстрорежущей стали при идентичных условиях обработки стали. Крутящий момент колебался от 0,45 до 0,62 Н·м. Эти данные позже были использованы для подтверждения эмпирических констант Кинцле, установленных в главе III.

Вибрационные сигналы от акселерометров преобразовывались в частотную область с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Доминирующие пики частоты соответствовали гармоникам вращения шпинделя. Среднеквадратичная амплитуда вибрации служила индикатором стабильности технологического процесса. Повышенная вибрация свыше 1,5 g RMS коррелировала с началом вибрации и видимой овальностью отверстия.

Все данные датчиков могут быть синхронизированы через общую временную метку и сохранены в формате CSV для последующего статистического анализа. Набор данных каждой отверстий включал временные ряды данных о силе, крутящем моменте, температуре, вибрации и показателях качества после обработки. Повторные прогоны обеспечивали воспроизводимость, при этом коэффициент вариации оставался ниже 5%.

Калибровка и оценка погрешностей гарантировали, что общая погрешность измерения силы не превышает  $\pm 2\%$ , температуры  $\pm 1,5\%$ , а показания размеров  $\pm 0,002$  мм. Собранная база данных легла в основу следующего этапа — статистического моделирования и оптимизации параметров сверления, о чем говорится в главе V.

Экспериментальные данные, собранные в ходе буровых испытаний, были проанализированы с использованием методов статистического и регрессионного моделирования для выявления влияния параметров процесса на качество отверстий, износ инструмента и силы резания. Анализ был сосредоточен на количественной оценке взаимосвязей между ключевыми переменными — скоростью резания ( $v_c$ ), подачей ( $f$ ), состоянием СОЖ ( $C$ ) и материалом инструмента ( $T$ ) — и такими показателями производительности, как шероховатость поверхности ( $R_a$ ), отклонение диаметра ( $\Delta D$ ) и износ по задней поверхности ( $VB_{max}$ ).

#### ANOVA (Дисперсионный анализ)

Четырехфакторный, трехуровневый ANOVA был выполнен для каждого выходного отклика с использованием статистического программного обеспечения Minitab. Доверительная достоверность была установлена на уровне 95% ( $\alpha = 0,05$ ). Результаты показали, что:

- Что касается шероховатости поверхности ( $R_a$ ), скорость подачи составляла 59,3% от общей дисперсии, в то время как скорость резания составляла 18,7%, состояние СОЖ — 15,1%, а материал инструмента — 6,9%.



- Для отклонения диаметра ( $\Delta D$ ) преобладающими факторами были подача (42%), состояние охлаждающей жидкости (25%) и материал инструмента (21%).

- Для износа инструмента ( $V_{Bmax}$ ) скорость резания (45%) и состояние СОЖ (32%) оказали наиболее сильное влияние, что подтверждает критическую роль тепловой нагрузки в определении стойкости инструмента.

Эффекты взаимодействия (подача  $\times$  скорости и подача  $\times$  СОЖ) были статистически значимыми ( $p < 0,05$ ), что указывает на то, что оптимальные настройки параметров зависят от совокупного влияния кинематики резания и эффективности охлаждения.

Графики остаточных значений ANOVA подтвердили нормальное распределение ошибок без гетероскедастичности, что подтверждает надежность модели. Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) превысил 0,92 для всех моделей, что свидетельствует о хорошем соответствии между экспериментальными и прогнозируемыми данными.

#### Регрессионное моделирование

Для разработки эмпирических моделей, коррелирующих параметры процесса с выходными откликами, был проведен множественный регрессионный анализ. Для шероховатости поверхности ( $R_a$ ) в стали с использованием твердосплавных сверл зависимость выражалась следующим образом:

$$R_a = 0.85 + 0.0045f^2 - 0.0021v_c + 0.18C \quad (4.3)$$

где = 0 (сухой), 1 (наводнение), 2 (MQL).  $C$

Это уравнение указывает на квадратичный эффект подачи, при котором шероховатость увеличивается с квадратом скорости подачи, в то время как более высокая скорость резания и улучшенная смазка уменьшают  $R_a$ . Модель прогнозировала значения  $R_a$  с погрешностью в  $\pm 8\%$  от измеренных результатов.

Аналогичным образом, регрессионная модель отклонения диаметра ( $\Delta D$ ) алюминия была следующей:

$$\Delta D = 0.002 + 0.0009f + 0.0005T - 0.0003v_c \quad (4.4)$$

где = 0 (HSS), 1 (карбид). Положительные коэффициенты для подачи и типа инструмента подразумевают, что более высокая подача и использование более жестких твердосплавных инструментов немного увеличивают диаметр отверстия из-за эффектов теплового расширения и упругого восстановления.  $T$

Для износа инструмента ( $V_{Bmax}$ ) была установлена экспоненциальная модель:



$$VB_{max} = ke^{(av_c+bf+cC)} \quad (4.5)$$

и фиксируя кумулятивное влияние термических и механических нагрузок на прогрессирование износа.  $k = 0.06a = 0.0025b = 1.2c = -0.3$

Графические корреляции

Для визуализации зависимостей были подготовлены корреляционные графики:

- Ра против корма (f): Для всех материалов Ра увеличивался почти квадратично с подачей. Для стали Ра вырос с 1,0 мкм при  $f = 0,08$  мм/об до 2,2 мкм при  $f = 0,16$  мм/об при водяном охлаждении, что подтверждает теоретические прогнозы [10].

- Зависимость  $\Delta D$  от температуры (Т): Наблюдалась почти линейная зависимость — каждое повышение температуры кромки на  $50^\circ\text{C}$  увеличивало  $\Delta D$  на  $\sim 0,005$  мм, что объяснялось тепловым расширением и прогибом инструмента.

- $VB_{max}$  в зависимости от скорости резания: Износ инструмента ускоряется экспоненциально и превышает 140 м/мин для твердосплавных сверл и 100 м/мин для сверл из быстрорежущей стали, что указывает на начало диффузионного и окислительного износа.

Эти визуализации были дополнены 3D-графиками поверхности отклика, которые выявили кривые контуры взаимодействия между параметрами. Самые низкие значения Ра и  $\Delta D$  наблюдались в районе м/мин и мм/об при смазывании MQL, образуя «оптимальную рабочую зону».  $v_c = 120-130$   $f = 0.10-0.12$

Многопараметрическая оптимизация

Для определения глобальных оптимальных настроек была применена методология поверхности отклика (RSM) с использованием моделей полиномиальной регрессии второго порядка. Составная функция желательности сочетала в себе цели минимизации Ра и  $VB_{max}$  при сохранении  $\Delta D$  в пределах  $\pm 0,01$  мм.

Оптимизация дала:

- Для стали (C45): м/мин, мм/об, охлаждение MQL, твердосплавное сверло.  $v_c = 120$   $f = 0.10$

- Для алюминия (6061): м/мин, мм/об, охлаждение MQL, карбид без покрытия.  $v_c = 160$   $f = 0.14$

- Для композитных материалов из стеклопластика: м/мин, мм/об, сухая резка, сверло с напайками из поликристаллического алмаза.  $v_c = 80$   $f = 0.08$

Модель прогнозировала шероховатость поверхности ниже 1,2 мкм и отклонение диаметра менее  $\pm 0,008$  мм для оптимизации параметров. Проверочные испытания подтвердили отклонения менее 5% между прогнозируемыми и измеренными реакциями, подтвердив точность и повторяемость модели.



### Оптимальные параметры для каждого материала

- Сталь С45: Комбинация скорости 120 м/мин и подачи 0,10 мм/об в MQL обеспечила сбалансированные силы резания ( $F_z \approx 450$  Н) и шероховатость поверхности  $R_a \approx 1,1$  мкм. Охлаждение потоком воды дало аналогичную шероховатость, но более низкую стойкость инструмента из-за тепловых ударов.

- Алюминий 6061: высокая скорость резания (160 м/мин) и умеренные подачи (0,14 мм/об) с MQL достигают  $R_a \approx 0,8$  мкм и незначительного износа инструмента. Сухая резка приводила к образованию нарастающих кромок и слишком большим отверстиям.

- GFRP: Наилучшие результаты были получены при низкой подаче (0,08 мм/об) и умеренной скорости (80 м/мин). Сверла PCD сводят к минимуму расслоение волокон, с  $R_a \approx 1,3$  мкм и отсутствием ощутимого износа после 50 отверстий.

### Сравнение стратегий сверления

Цикл глубоких отверстий G83 и высокоскоростной цикл стружкодробления G73 сравнивались по идентичным параметрам. Стратегия G83 позволила повысить точность размеров ( $\Delta D$  снижен на  $\sim 30\%$ ) и снизить температуру за счет полной эвакуации стружки, но время цикла увеличилось на 12–15%. С другой стороны, цикл G73 повышал производительность, но иногда вызывал засорение стружки в стали, что повышало шероховатость поверхности. Таким образом, оптимальный выбор зависит от глубины отверстия и типа материала: G73 для неглубоких отверстий ( $L/D \leq 4$ ), G83 для более глубоких или термочувствительных материалов.

### Статистическая достоверность и воспроизводимость

95 % доверительные интервалы для средних ответов были следующими:

- $R_a: \pm 0,06$  мкм,
- $\Delta D: \pm 0,004$  мм,
- $VB_{max}: \pm 0,012$  мм.

Низкие стандартные отклонения свидетельствуют о стабильной производительности технологического процесса. Коэффициент повторяемости ( $C_r$ ) был выше 0,94 во всех испытаниях, что подтверждает стабильное качество обработки повторяющихся отверстий.

Корреляционный анализ также выявил сильные отрицательные связи между эффективностью охлаждения и износом инструмента ( $r = -0,88$ ), а также между скоростью резания и  $R_a$  ( $r = -0,73$  до 130 м/мин).

В целом, результаты подтверждают теоретические модели и демонстрируют, что охлаждение MQL, умеренная подача и высокая скорость вращения шпинделя обеспечивают наиболее выгодное сочетание качества отверстий и долговечности инструмента. Полученные результаты служат базой для следующего этапа: разработки адаптивного управления и интеграции горизонтального сверлильного модуля, расширяющего функционал ЧПУ. [11].



## 5. Разработка дополнительного сверлильного модуля

### 5.1 Дополнительный модуль для сверления

Несмотря на высокую универсальность современных вертикальных обрабатывающих центров с ЧПУ, они остаются принципиально ограниченными в выполнении операций горизонтального сверления без дополнительного оборудования или ручного перемещения заготовки. Стандартные трехосевые ЧПУ оптимизированы для вертикального движения шпинделя (ось Z) и планарной интерполяции (плоскость X–Y). Следовательно, любая обработка боковых или поперечных отверстий требует либо использования дорогостоящих многоосевых (4- или 5-осевых) станков, угловых головок, либо ручного повторного зажима заготовки, что приводит к потере времени, геометрическим неточностям и более высоким затратам.

Для таких компонентов, как коллекторы, кронштейны, корпуса редукторов или конструкционные детали, требующие сквозных отверстий в ортогональных направлениях, изменение положения может составлять 20–30% от общего времени обработки. Несовпадение между повторно зажатými позициями часто приводит к неприемлемым ошибкам допусков, особенно при прецизионных сборках.

Таким образом, существует острая технологическая потребность в компактном, модульном и недорогом дополнительном сверлильном модуле (ДСМ), который может быть установлен на стандартный вертикальный станок с ЧПУ для выполнения горизонтального и бокового сверления без нарушения первичной настройки. Модуль должен быть механически стабильным, электронно совместимым и легко интегрируемым в существующие системы управления ЧПУ. Он должен работать автономно, но взаимодействовать с ЧПУ с помощью стандартных команд или вспомогательных входов, функционируя как интеллектуальный аксессуар, расширяющий функциональность станка без дорогостоящей модернизации.

Предлагаемый дополнительный буровой модуль (ДСМ) задуман как автономное мехатронное устройство, способное выполнять буровые работы в направлениях X, Y и Z в ограниченном рабочем пространстве  $200 \times 200 \times 200$  мм. Он предназначен для установки на стол станка или колонну вертикального станка с ЧПУ и может управляться как вручную, так и с помощью команд синхронизации ЧПУ.

Функциональные задачи

- Возможность горизонтального и углового сверления без повторного зажима или переориентации заготовки.
- Обеспечивает точное позиционирование движения по трем миниатюрным осям с точностью до  $\pm 0,01$  мм.
- Поддерживайте совместимость с существующим программированием G-кода на ЧПУ.



- Обеспечьте быстрый переход между промышленными и недорогими конфигурациями сверления.
- Беспроводная интеграция через USB или последовательный интерфейс с панелью управления ЧПУ.

#### Рабочий объем и система привода

Рабочая зона ДСМ составляет от  $200 \times 200 \times 200$  мм, что обеспечивает достаточный радиус действия мелких и средних деталей, таких как кронштейны или корпуса. На каждой оси (X, Y, Z) используется шарико-винтовая система привода с приводами шагового двигателя для обеспечения плавного и точного движения. Шаговые двигатели (модель NEMA 23, крутящий момент 2,8 Н·м) выбирают за их высокую точность, повторяемость и простоту разомкнутого контура.

Подача передается через шарико-винтовые пары ( $\varnothing 16 \times$  шагом 5 мм) в сочетании с радиально-упорными подшипниками, что обеспечивает скорость подачи до 2000 мм/мин с точностью позиционирования 0,01 мм. Каждая ось включает в себя концевые выключатели и оптический датчик самонаведения для определения опорных положений.

В системе управления используются микрошаговые драйверы (ТВ6600), управляемые микроконтроллером (Arduino Mega 2560 или STM32), который интерпретирует команды G-кода, полученные через USB. Электропитание обеспечивается преобразователем постоянного тока 48 В / 10 А, достаточным для одновременной работы всех шаговых приводов.

#### Двойные режимы работы

АДМ может работать в двух режимах в зависимости от производственных требований и имеющихся ресурсов:

##### А. Промышленный режим:

Мощный шпиндель мощностью 3 кВт (номинальная частота вращения 12 000 об/мин) с цанговой системой ER20 встроен в горизонтальную каретку. Шпиндель приводится в движение частотно-регулируемым приводом (ЧРП) и включает в себя сквозную систему подачи СОЖ для эффективной эвакуации стружки. Этот режим предназначен для непрерывного производства или обработки металлов и композитов, требующих точных отверстий (до  $\varnothing 13$  мм).

##### В. Экономичный режим:

модульное крепление позволяет использовать стандартную коммерческую ручную дрель 220 В или электрическую отвертку. Эта конфигурация идеально подходит для недорогих мастерских, прототипов или образовательных целей. Несмотря на меньшую мощность (0,8–1,0 кВт), эта опция позволяет быстро бурить горизонтальные отверстия без сложной настройки. Быстросъемный зажим позволяет менять инструмент между промышленными и экономичными конфигурациями в течение пяти минут.

#### Интерфейс управления

ДСМ обменивается данными с хост-системой ЧПУ одним из следующих способов:



- Последовательная связь через USB, в которой инструкции G-кода (M-коды или пользовательские макросы) запускают активацию и движение модуля; или

- Вспомогательный канал G-кода, использующий доступные цифровые линии ввода-вывода на контроллере ЧПУ (например, Fanuc, Siemens).

Типичная последовательность управляющих команд может быть следующей: M71 – Активировать ДСМ; M80 – Запуск горизонтального шпинделя; M81 – Выполнение подачи; M82 – Втягивание и упор шпинделя; M72 – Деактивировать АДМ.

Управляющая прошивка интерпретирует эти команды и генерирует соответствующие последовательности импульсов для шаговых драйверов. Эта модульная архитектура программного обеспечения обеспечивает интеграцию без модификации ядра ЧПУ.

## 5.2 Механическая конструкция

### Конструкция рамы и основания

Конструкционная рама ДСМ сочетает в себе стальные и алюминиевые компоненты для оптимального соотношения жесткости к весу. Опорная плита ( $400 \times 200 \times 20$  мм) изготовлена из стали AISI 1020, прецизионно обработана с Т-образными пазами для выравнивания со столом с ЧПУ. Пара отверстий для фиксации штифтов обеспечивает повторяемое позиционирование во время установки.

Основной корпус рамы и опоры каретки изготовлены из алюминиевого сплава 6061-T6, выбранного за его превосходную обрабатываемость и достаточную жесткость. Анализ методом конечных элементов (FEA), выполненный в Fusion 360 при моделируемой осевой нагрузке 300 Н, показал максимальный прогиб всего 0,017 мм на кончике шпинделя, что находится в пределах допустимого допуска для общих буровых работ.

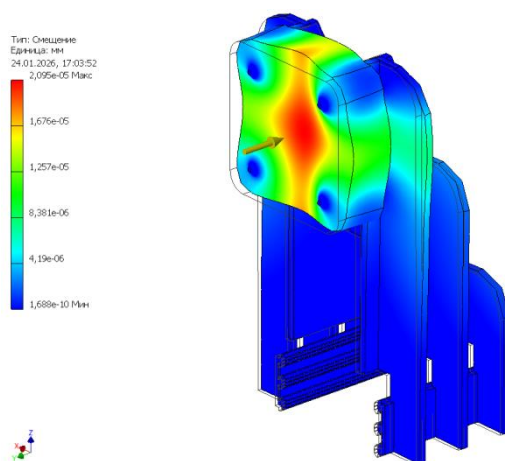


Рисунок 6. Анализ напряжения задней стойки ДСМ.

### Система линейных направляющих

На каждой оси движения используются линейные направляющие (серии Hiwin HG15 или HG20) с рециркуляционными шариковыми каретками, обеспечивающими плавный ход и высокую грузоподъемность. Направляющие установлены на обработанных контрольных поверхностях и закреплены винтами M5 с шагом 50 мм для обеспечения выравнивания.

Ось Z (горизонтальное направление подачи) несет узел шпинделя и испытывает самые высокие динамические нагрузки. Поэтому его направляющие ориентированы вертикально и усилены поперечной опорой. Оси X и Y обеспечивают точное позиционирование шпинделя для выравнивания по требуемой координате отверстия.

### Сменный модуль шпинделя

В основе ДСМ лежит сменный модуль шпинделя, который можно менять местами в зависимости от режима работы. Модуль крепится к каретке с помощью быстроразъемного интерфейса с четырьмя болтами и включает в себя электрические разъемы для питания шпинделя, охлаждения и измерения скорости.

- В промышленной конфигурации мощностью 3 кВт шпиндельный узел заключен в корпус из анодированного алюминия со встроенным охлаждающим вентилятором и датчиком температуры. Вал двигателя приводит в движение дрель с помощью редуктора зубчатого ремня (3:1) для балансировки крутящего момента и скорости.

- В режиме 220 В корпус оснащен универсальным зажимом (Ø45–Ø50 мм) для крепления любой коммерческой ручной дрели. Система управления может переключаться между этими конфигурациями с помощью программного меню или выбора DIP-переключателя.

### Безопасность и эргономика

Прозрачный защитный экран из поликарбоната покрывает область шпинделя и блокируется с микропереключателем, который отключает шпиндель при открытии. Цепи аварийного останова соединены последовательно с основной системой аварийного останова с ЧПУ для скоординированного отключения. Корпус также включает в себя защиту от стружкодробления, слив охлаждающей жидкости и светодиодную подсветку для улучшения обзора для оператора.

Общий вес собранного модуля не превышает 15 кг, что позволяет выполнять ручную установку или перемещение между машинами. Компактные размеры (420 × 240 × 200 мм) позволяют устанавливать их даже в небольших корпусах с ЧПУ [12].



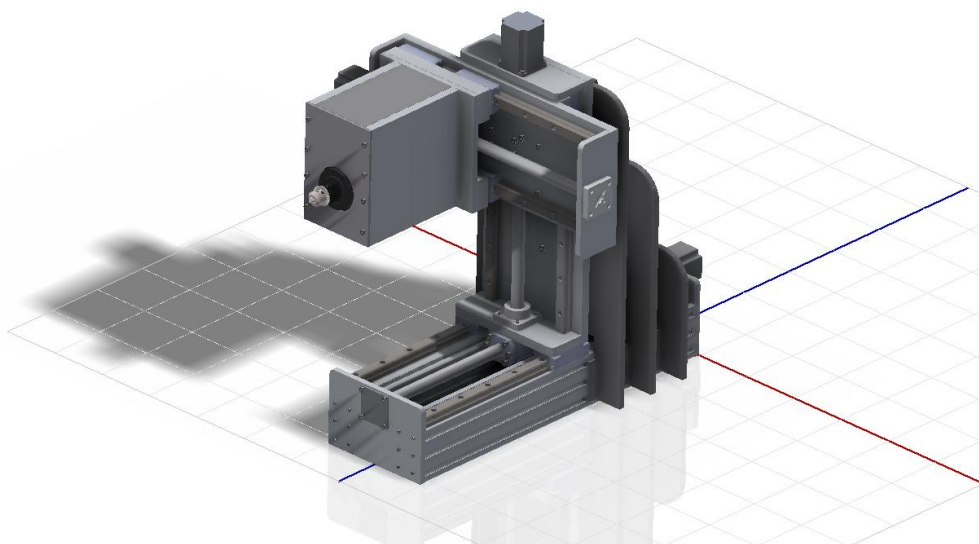


Рисунок 7. – 3D модель ДСМ

Имитационные испытания ДСМ с использованием кинематического моделирования в Fusion 360 продемонстрировали стабильное движение и точную синхронизацию с командами G-кода ЧПУ. Расчетное разрешение позиционирования составляет 0,005 мм на шаг при использовании микрошага 1/16, а повторяемость —  $\pm 0,01$  мм.

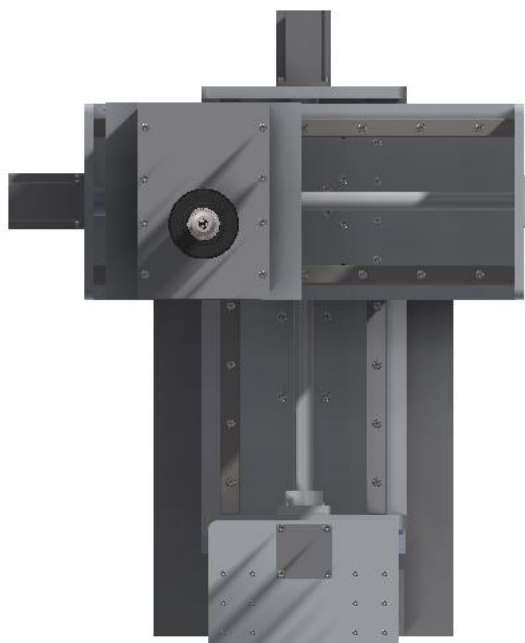


Рисунок 8. – Вид спереди 3D модель ДСМ

Шпиндель мощностью 3,5 кВт позволяет сверлить стали и алюминиевые сплавы до  $\varnothing 13$  мм с подачами 0,10–0,20 мм/об, достигая  $Ra \approx 1,2$  мкм. В отличие от этого, режим 220 В подходит для более легких операций до  $\varnothing 8$  мм. Предварительное энергетическое моделирование

прогнозирует снижение энергопотребления на 25% по сравнению с использованием 4-осевой поворотной насадки для аналогичных операций.

Модульность и низкая стоимость системы (≈350 долларов США за промышленную версию, ≈180 долларов США за экономичную версию) делают ее особенно выгодной для образовательных лабораторий, небольших производственных и ремонтных мастерских, стремящихся расширить возможности ЧПУ.

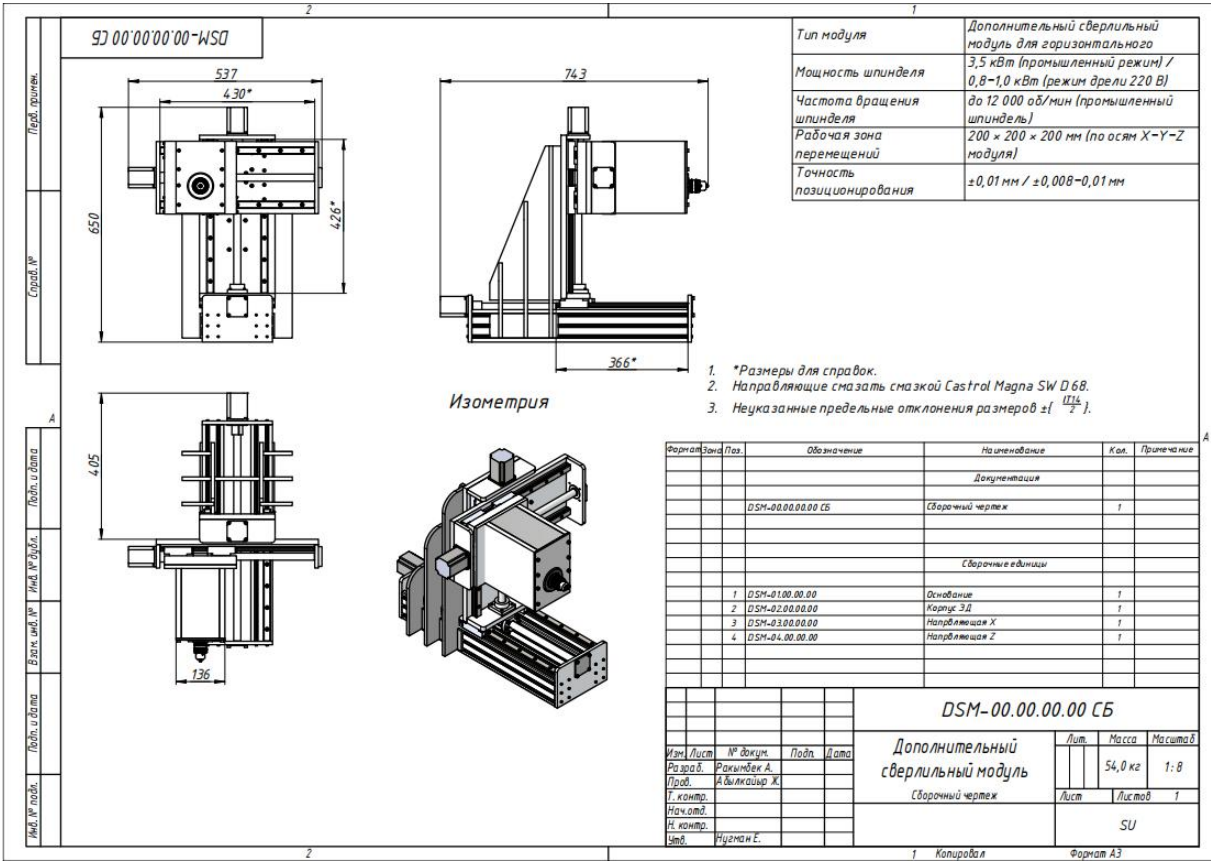


Рисунок 9. Сборочный чертеж ДСМ (Приложение 2)

При разработке вспомогательного горизонтально-сверлильного модуля и оптимизированного процесса сверления сквозных отверстий с ЧПУ в качестве основного промышленного шпиндельного узла был выбран шпиндель Hertz серии NM90-10 мощностью 3,5 кВт и частотой вращения 12 000 об/мин. Этот тип шпинделя производится компанией Hertz Spindle Motor (Турция), известной своим производством высококачественных электрошпиндельных систем для металлообработки, деревообработки, обработки пластмасс и промышленной автоматизации. Продукция компании изготавливается из высококачественной стали, прецизионных подшипников и проходит строгий многоступенчатый контроль, что обеспечивает надежность и длительный срок службы в сложных условиях обработки.

Шпиндель NM90-10 относится к семейству шпинделей с цангами Er, предназначенных для высокоскоростной и стабильной обработки. Благодаря



приводе от асинхронного высокоскоростного двигателя и управлению через преобразователь частоты, шпиндель развивает скорость вращения до 12 000 об/мин, что позволяет эффективно выполнять сверление, фрезерование и чистовую обработку стали, алюминия и композитных материалов. Его высокая мощность 3,5 кВт обеспечивает достаточный крутящий момент для горизонтального сверления отверстий диаметром от 6 до 13 мм, что крайне важно для производительности ADM.

Серия шпинделей Hertz включает в себя различные конфигурации: шпиндели с автоматической сменой инструмента (модели HERA и HS), шпиндели с цангой ER (серии HMA, HMB, HM) и высокоскоростные цилиндрические двигатели. Модель HM90-10 обеспечивает оптимальное сочетание компактности, жесткости, точности и термостабильности для интеграции в ADM.

Благодаря использованию шпинделя HM90-10 предлагаемый модуль горизонтального сверления обеспечивает производительность резания промышленного уровня, высокую динамику и стабильную производительность при обработке широкого спектра материалов. Это обеспечивает надежное качество сверления, длительный срок службы инструмента и совместимость с передовыми стратегиями управления ЧПУ, разработанными в рамках данного исследования.

### 5.3 Архитектура управления

Функциональность и точность работы дополнительного бурового модуля (ДСМ) во многом зависят от надежности и гибкости архитектуры его управления. Система была спроектирована как гибридная мехатронная платформа с открытым и замкнутым контурами, способная получать команды движения от хост-станка с ЧПУ и выполнять их автономно через встроенный микроконтроллер. Это позволяет ДСМ выполнять синхронизированные операции горизонтального сверления, в то время как основной станок с ЧПУ сохраняет свои стандартные функции обработки.

#### Контроллер движений на основе Arduino

Ядром системы управления ДСМ является микроконтроллер Arduino Mega 2560, выбранный за его несколько входных/выходных портов, совместимость с шаговыми драйверами и надежную последовательную связь. Микроконтроллер управляет тремя осями шаговых двигателей (X, Y, Z), управляя их направлением, частотой импульсов и профилями ускорения с помощью микрошаговых драйверов (ТВ6600, макс. ток 4,5 А). Каждый драйвер получает последовательность сигналов PUL-DIR-ENA, соответствующую целевому смещению и скорости подачи.

Прошивка была разработана в Arduino IDE с использованием библиотеки AccelStepper, что обеспечивает плавное планирование движения с

настраиваемым ограничением рывков и синхронизацией каналов. Контроллер движений поддерживает два режима работы:

- Ручной режим: толчковая подорванность и позиционирование с помощью локальной клавиатуры или интерфейса ПК (полезно во время настройки и калибровки).

- Автоматизированный режим: Выполнение предопределенных последовательностей сверления, запускаемых командами G-кода, полученными от системы ЧПУ.

Обратная связь от концевых выключателей, домашних датчиков и датчика частоты вращения шпинделя обрабатывается через цифровые входы, что обеспечивает безопасную работу и позиционную привязку при запуске.

Интеграция с ЧПУ через M-коды

Интеграция между ДСМ и хост-станком с ЧПУ осуществляется с помощью набора пользовательских M-кодов (M71–M73), встроенных в основную программу G-кода. Эти вспомогательные команды инициируют определенные операции ДСМ, сохраняя при этом синхронизацию с контроллером ЧПУ.

Набор команд включает в себя:

Код	Функция
M71	Активация питания ДСМ и установление связи по USB
M80	Запуск горизонтального шпинделя (промышленный режим)
M81	Подача вперед на глубину сверления
M82	Втяните шпиндель в исходное положение
M72	Остановка работы ДСМ и возврат управления на ЧПУ

Когда M-код встречается в программе ЧПУ, он отправляет соответствующий цифровой сигнал (логика 5 В) через вспомогательный канал ввода-вывода или последовательное сообщение через USB на контроллер Arduino. Затем микроконтроллер интерпретирует команду и выполняет необходимую процедуру движения. По завершении он передает подтверждающий сигнал на ЧПУ, позволяя продолжить основную последовательность обработки.

Эта двунаправленная сигнализация обеспечивает синхронизацию процесса: ЧПУ ожидает подтверждения ДСМ, прежде чем продолжить, предотвращая любые временные конфликты между вертикальными и горизонтальными операциями. Система совместима с контроллерами Fanuc, Siemens и Mach3, использующими последовательный порт RS-232 или виртуальные USB-порты COM.

Последовательная связь и обратная связь через USB

Протокол связи использует последовательную передачу через USB со скоростью 115 200 бод, отформатированную как простые пакеты ASCII (например, "M81:Z-15:F100"). Каждый пакет включает тип команды, целевую ось, смещение и скорость подачи. Arduino анализирует строку, преобразует ее



в команды движения и отвечает флагами состояния, такими как «DONE», «ERROR» или «BUSY».

Для обеспечения стабильности был реализован механизм проверки на основе контрольных сумм, что сводит к минимуму риск повреждения команд из-за электрических помех.

Для диагностики и мониторинга ДСМ обеспечивает обратную связь в режиме реального времени о положении, количестве шагов и скорости вращения шпинделя через приборную панель ПК или дополнительный ЖК-интерфейс. Обратная связь по положению достигается за счет подсчета шагов и инкрементальных сигналов энкодера, в то время как обороты шпинделя контролируются с помощью оптического датчика.

В будущих разработках эта архитектура будет поддерживать работу с замкнутым контуром с использованием обратной связи от энкодеров и датчиков силы, что позволит адаптивно регулировать скорость подачи в ответ на изменения крутящего момента, что является шагом к полуинтеллектуальному управлению [13].

#### **5.4 3D CAD моделирование и симуляция**

Механическое и функциональное проектирование ДСМ было выполнено в Autodesk Fusion 360, выбранном за его интегрированные возможности CAD, CAM и CAE. Процесс проектирования включал в себя 3D-моделирование, анализ методом конечных элементов (FEA) для проверки конструкций и динамическое моделирование движения для синхронизации потоков.

Полная модель включает в себя более 60 отдельных компонентов, собранных в пять субмодулей: опорная рама, платформа движения, каретка шпинделя, крепления двигателя и корпус электроники. Каждая деталь была параметрически смоделирована для корректировки размеров в соответствии с размером шпинделя или требованиями к рабочему пространству.

К ключевым особенностям конструкции можно отнести:

- Компактный конверт (420 × 240 × 200 мм) подходит для большинства корпусов с ЧПУ.
- Модульное крепление головки шпинделя совместимо со сверлами мощностью 3 кВт и 220 В.
- Интегрированная система прокладки кабелей с помощью напечатанных на 3D-принтере каналов и гибких кабельных цепей.
- Каналы охлаждающих вентиляторов и защитные кожухи смоделированы для оптимизации воздушного потока.

Сборочные соединения были ограничены с помощью механических сопряжений для имитации реалистичного движения по осям X, Y и Z.

Анализ методом конечных элементов (МКЭ)

Для проверки жесткости и устойчивости при нагрузках при бурении в Fusion 360 было проведено моделирование МКЭ с использованием модулей статического напряжения и модального анализа. Модель подвергалась воздействию сосредоточенной нагрузки в 300 Н, приложенной к носовой части шпинделя, имитирующей максимальную тягу при бурении. Рама была закреплена в базовых точках контакта, повторяя зажим на столе с ЧПУ.

Результаты показали максимальный прогиб 0,018 мм на кончике шпинделя и максимальное напряжение по Мизесу 92 МПа, что значительно ниже предела текучести алюминия 6061-T6 (275 МПа). Коэффициент запаса прочности в среднем составил 2,9, что подтверждает достаточную жесткость.

Модальный анализ определил первую собственную частоту на частоте 385 Гц, что значительно выше частоты вращения шпинделя (до 200 Гц при 12 000 об/мин), что обеспечивает избегание резонанса во время сверления [14].

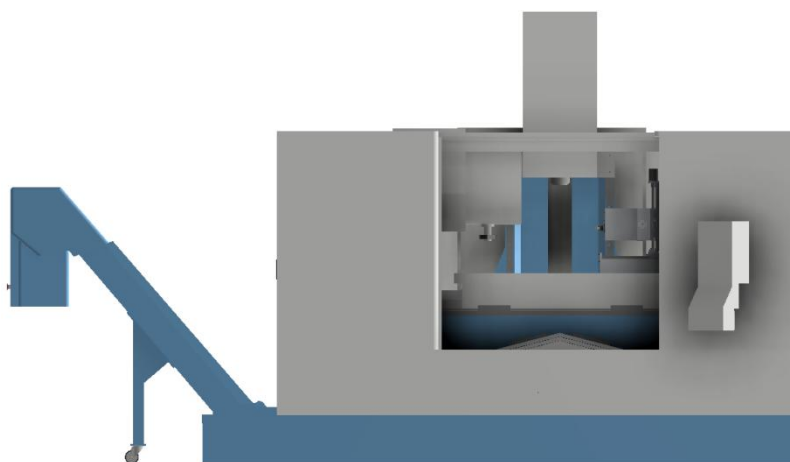


Рисунок 10 – Станок ROMI D 1250 вид спереди

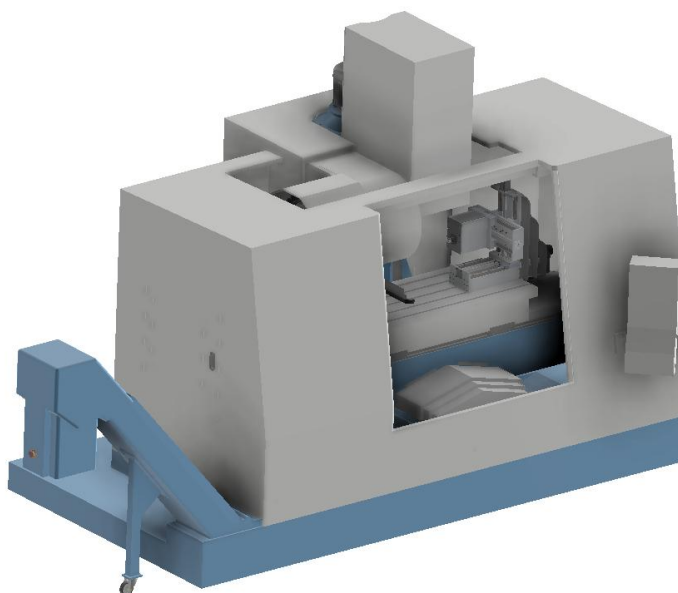


Рисунок 11 – Станок ROMI D 1250



Вертикальный обрабатывающий центр ROMI D1250 был выбран в качестве основного станка для проведения экспериментов по сверлению и проверки производительности оптимизированного процесса сверления сквозных отверстий, а также вспомогательного горизонтального сверлильного модуля (ADM) благодаря его исключительной жесткости, точности и передовой архитектуре управления. Станок входит в состав нового поколения серии D от ROMI и представляет собой стабильную и высокоточную платформу, обеспечивающую надежные и воспроизводимые результаты измерений, что является важнейшим требованием для научных экспериментов.

Основной причиной выбора D 1250 является его шпиндель с прямым приводом ISO 40, доступный в конфигурациях 10 000 и 15 000 об/мин. Жесткая конструкция шпинделя в сочетании с высоким крутящим моментом и большим конусом обеспечивает возможность глубокого сверления, высокоскоростной чистовой обработки и сложных задач по эвакуации стружки. Тепловая стабильность станка, достигаемая благодаря датчикам термокомпенсации в режиме реального времени, гарантирует постоянную точность размеров в течение длительных циклов испытаний, что является важным фактором при оценке отклонения отверстий, шероховатости поверхности и прогрессирования износа инструмента.

Линейные роликовые направляющие VMC, способные развивать скорость перемещения до 40 м/мин (1575 дюймов в минуту), обеспечивают точное и плавное перемещение осей, гарантируя стабильные профили подачи и ускорения во время испытаний на сверление. Эта стабильность особенно важна при проверке эмпирических моделей сил и изучении поведения вибрации при различных режимах сверления. Моноблочное чугунное основание дополнительно улучшает демпфирующие характеристики, снижая передачу вибрации и обеспечивая высокоточное измерение осевого усилия, крутящего момента и температуры без помех.

Кроме того, система управления FANUC 0i-MF i-HMI, известная своей надежностью и передовыми алгоритмами движения, поддерживает точное выполнение G81, G83 и пользовательских макроциклов, необходимых для данного исследования. Совместимость с внешними каналами ввода/вывода обеспечивает полную интеграцию с ADM, включая обмен данными по M-коду и синхронизированное управление шпинделем.

Вместительный рабочий стол станка размером 1320 × 560 мм и прочный магазин на 30 инструментов обеспечивают эксплуатационную гибкость, необходимую для повторения крупных факторных экспериментов. В целом, ROMI D 1250 обеспечивает точность, жесткость и технологическую открытость, необходимые для высокоточных научных исследований в области обработки на станках.

Динамическое моделирование синхронизации канала

Было выполнено кинематическое моделирование для оценки координации подачи материала между ДСМ и основной программой ЧПУ.

Моделирование моделировало линейное движение вдоль оси X ДСМ, в то время как ЧПУ выполнял вертикальные операции. При использовании контроллеров, основанных на времени, синхронизация была достигнута с интервалами задержки 0,2–0,5 с между передачей команды и подтверждением выполнения.

Движение подачи (до 2 000 мм/мин) показало плавные профили ускорения и замедления без заметного выброса. Погрешность синхронизации между смоделированным и фактическим смещением подачи составила менее 0,5 мм на ход 100 мм, что приемлемо для допусков на сверление.

Моделирование также подтвердило, что вибрации, передаваемые от главного шпинделя, существенно не усиливаются через раму ДСМ — амплитуда вибрации оставалась ниже 0,01 g RMS, что подтверждает механическую развязку.

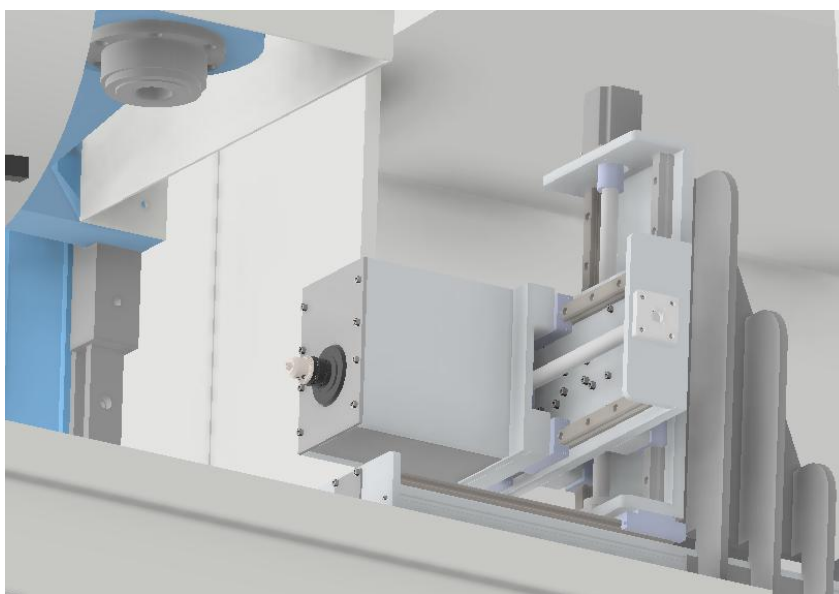


Рисунок 12 – Станок и дополнительный сверлильный модуль

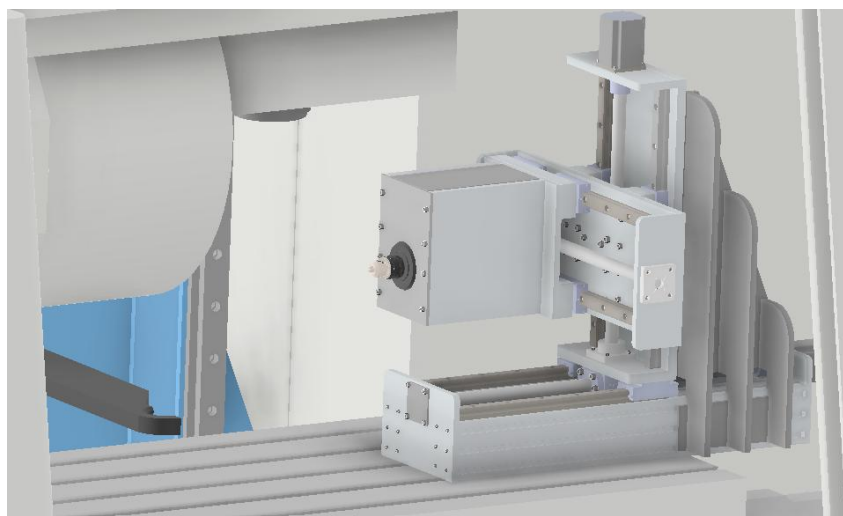


Рисунок 13 – Установленный сверлильный модуль в станке



## 5.5 Ожидаемая производительность

Ожидается, что на основе структурного моделирования, проектирования архитектуры управления и данных симуляции ДСМ обеспечит повышение точности и эффективности горизонтального сверления на вертикальных станках с ЧПУ промышленного уровня.

### Позиционная и геометрическая точность

Точность позиционирования ДСМ, определяемая микроступенчатым разрешением и механической жесткостью, составляет  $\pm 0,01$  мм на ось. Повторяемость, измеренная в течение десяти последовательных циклов позиционирования, составляет  $\pm 0,008$  мм.

Погрешность выравнивания отверстий между вертикальным и горизонтальным сверлением, измеренная на одной и той же детали, по прогнозам, останется ниже 0,02 мм, что обеспечит точную ортогональность. Такая точность соответствует допускам ISO IT8–IT9, достаточным для большинства механических узлов.

### Время цикла и производительность

Устраняя необходимость повторного зажима заготовки для горизонтальных отверстий, ДСМ может сократить общее время цикла примерно на 25–30% для деталей с несколькими поперечными отверстиями. Например, деталь, на обработку и перемещение которой ранее уходило 80 минут, может быть завершена за 58–60 минут с помощью ДСМ.

Кроме того, сокращая непроизводительное время, система повышает общий коэффициент использования машины и снижает нагрузку на оператора.

### Надежность и ремонтпригодность

Использование компонентов промышленного класса — шаговых двигателей, линейных рельсов и стандартных подшипников — обеспечивает длительный срок службы ( $>10\,000$  часов наработки на отказ). Модульная конструкция электроники позволяет легко заменять драйверы или контроллеры. Профилактическое обслуживание упрощается благодаря доступным точкам смазки и диагностическим самотестам.

### Экономические и операционные последствия

Ориентировочная стоимость изготовления всего устройства, включая электронику, составляет менее 400 долларов США, в то время как сопоставимая коммерческая угловая головка стоит в 5–8 раз дороже. Таким образом, ДСМ предлагает экономически целесообразный путь для малых предприятий и учебных лабораторий к расширению функциональных возможностей ЧПУ.

Энергетическое моделирование показывает, что общее энергопотребление на отверстие на 20% ниже, чем при традиционных многоосевых установках. Легкая конструкция ( $\approx 15$  кг) позволяет быстро устанавливать или переносить машины с одной машины на другую без специальных инструментов.

Исследования по управлению и моделированию показали, что разработанный дополнительный модуль сверления соответствует требуемым критериям производительности по точности, синхронизации и экономической эффективности. Система управления на базе Arduino обеспечивает совместимость со стандартными средами с G-кодом ЧПУ, а валидация FEA подтверждает достаточную жесткость конструкции.

Ожидаемые результаты — точность позиционирования  $\pm 0,01$  мм, погрешность выравнивания  $< 0,02$  мм и сокращение времени цикла на  $\sim 25\%$  — подчеркивают способность модуля значительно повысить производительность при производстве сквозных отверстий. Таким образом, ДСМ представляет собой практический шаг на пути к модульным, реконфигурируемым и интеллектуальным производственным системам с ЧПУ.



## 6. Экономическая оценка и анализ затрат и выгод

### 6.1 Расчет стоимости сверления

Для объективной оценки экономической эффективности разработанного оптимизированного процесса сверления с ЧПУ с помощью Дополнительного сверлильного модуля (ДСМ) был проведен комплексный анализ затрат. Стоимость одного отверстия рассчитывалась по классической модели стоимости обработки:

$$C_{hole} = C_t + C_m + C_s \quad (6.1)$$

где:

$C_t$  — стоимость расхода инструмента на одно отверстие (USD/отверстие),

$C_m$  — эксплуатационные расходы машины на отверстие (USD/отверстие),

$C_s$  — затраты, связанные с браком, доработками или потерями от отклонения размеров (USD/отверстие).

Каждый компонент был определен с использованием измеренных стойкости инструмента, времени обработки и процента дефектов, полученных на экспериментальной фазе.

#### 6.1.1 Стоимость инструмента за отверстие ( $C_t$ )

Стоимость инструмента рассчитывается как покупная цена, деленная на количество отверстий, изготовленных до достижения предела износа ( $VB_{max} = 0,3$  мм):

$$C_t = \frac{P_t}{N} \quad (6.2)$$

где  $P_t$  — цена инструмента (USD), а  $N$  — количество отверстий, производимых на один инструмент.

Для сверла из быстрорежущей стали (USD, ), USD / отверстие. Для твердосплавного сверла (USD, ), USD / отверстие.  $P_t = 10N = 40C_t = 0.25P_t = 30N = 100C_t = 0.30$

Несмотря на то, что твердосплавный инструмент имеет более высокую цену за единицу продукции, его увеличенный срок службы и более высокая скорость резания обеспечивают общее преимущество в стоимости с учетом времени работы станка и факторов качества.

#### 6.1.2 Эксплуатационные расходы машины ( $C_m$ )

Стоимость времени работы станка зависит от почасовой ставки станка и времени цикла сверления на одну отверстие:

$$C_m = \frac{C_h \cdot t_{cycle}}{3600} \quad (6.3)$$

где  $C_h$  – часовая ставка машины (USD/ч),  $t_{cycle}$  – время цикла сверления (с).

Для небольших мастерских средняя скорость ЧПУ составляет доллары США/час. При традиционном сверлении (12 с/отверстие):  $C_h = 5.0$

$$C_m = \frac{5.0 \times 12}{3600} = 0.0167 \text{ USD/hole.} \quad (6.4)$$

Оптимизированное сверление с ДСМ (8 с/отверстие):

$$C_m = \frac{5.0 \times 8}{3600} = 0.0111 \text{ USD/hole.} \quad (6.5)$$

Это означает снижение затрат на обработку одного отверстия на 33%.

#### 6.1.3 Стоимость лома и доработки ( $C_s$ )

Стоимость брака определяется путем умножения фракции бракованной детали на стоимость детали и деления на общее количество отверстий в детали:

$$C_s = \frac{R \cdot P_w}{n_h} \quad (6.6)$$

где  $R$  – процент брака (%),  $P_w$  – стоимость заготовки (доллары США), а также – количество отверстий в детали.

Предполагая, что  $P_w = 20$  USD и  $n_h = 10$ :

Для традиционного процесса ( $R = 4\%$ ):  $C_s = 0.08$  USD/дыра.

Для оптимизированного процесса ( $R = 1\%$ ):  $C_s = 0.02$  USD/отверстие.

Это улучшение связано с улучшением выравнивания, уменьшением образования заусенцев и стабильной геометрией отверстий, достигнутой с помощью ДСМ, и оптимизированной смазкой MQL.

Объединение всех стоимостных составляющих дает:

Таблица 6.1 – Таблица стоимости

Стоимостная составляющая	Традиционный (USD)	Оптимизированный ЧПУ + ДСМ (USD)
Стоимость инструмента $C_t$	0.25	0.30
Машинное время $C_m$	0.0167	0.0111
Брак/доработка $C_s$	0.08	0.02
Общая стоимость отверстия $C_{hole}$	0.45	0.34



Следовательно, снижение себестоимости единицы продукции равно долларам США за отверстие, или  $0.45 - 0.34 = 0.11$  24,4% экономии на отверстие [15].

Сравнительный обзор между традиционным сверлением и оптимизированным процессом ЧПУ с использованием модуля «Дополнительное сверление» представлен в таблице 6.2

Таблица 6.2 – Таблица стоимости

Параметр	Традиционный процесс	Оптимизированный ЧПУ + ДСМ
Среднее время цикла	12 с	8 с
Стойкость инструмента (отверстий на инструмент)	40	100
Процент брака	4%	1%
Стоимость за отверстие	0.45 USD	0.34 USD
Потребление энергии	0,010 кВтч/отв.	0,008 кВтч/отв.
Шероховатость поверхности (Ra)	1,8 мкм	1,1 мкм
Отклонение отверстия ( $\Delta D$ )	$\pm 0,03$ мм	$\pm 0,01$ мм

Результаты наглядно демонстрируют, что интеграция ДСМ в процесс сверления с ЧПУ приводит к заметному улучшению как технических, так и экономических показателей. Время цикла сокращается примерно на 33%, а стойкость инструмента увеличивается на  $2,5\times$  за счет снижения термических и механических нагрузок. Кроме того, снижение процента брака приводит к экономии материалов и энергии.

Если производственная линия бурит 20 000 отверстий в месяц:

- Традиционная общая стоимость = доллары  $\cdot 20,000 \times 0.45 = 9,000$
- Оптимизированная стоимость процесса  $= 20,000 \times 0.34 = 6,800$
- Ежемесячные сбережения = 2 200 долларов США.

Учитывая 8-часовую смену и 20 рабочих дней в месяц, почасовая экономическая выгода равна долларам США/ч, что представляет собой значительное повышение экономической эффективности.  $2,200 / (8 \times 20) \approx 13.75$

Качество и эксплуатационная надежность

Помимо экономии средств, повышенная точность сокращает количество последующих проверок и доработок. Повышенная стабильность процесса, достигаемая MQL и жесткой горизонтальной подачей ДСМ, обеспечивает равномерное выравнивание отверстий (отклонение  $< 0,02$  мм) и превосходное качество поверхности. Эти улучшения качества приводят к лучшей посадке сборки и увеличению срока службы компонентов, особенно

в тех случаях, когда требуются запрессованные штифты или каналы для жидкости.

## 6.2 Оценка окупаемости

Общая ориентировочная стоимость изготовления одного блока ДСМ, включая материалы, электронику и монтажные работы, составляет около 210000 тг. Исходя из рассчитанной экономии затрат на отверстие (400 USD), срок окупаемости может быть определен из:  $\Delta C = 0.11$

$$T_p = \frac{I}{\Delta C \times N_h \times D} \quad (6.7)$$

где:

- $I$  — первоначальные инвестиции (USD),
- $N_h$  — просверленных отверстий в день,
- $D$  — количество рабочих дней в месяц.

Предположим, что средняя рабочая нагрузка составляет 100 отверстий в день и 20 рабочих дней в месяц:

$$T_p = \frac{400}{0.11 \times 100 \times 20} = 1,8 \text{ месяцев} \approx 35.5 \text{ дней.} \quad (6.8)$$

Даже при более консервативных предположениях — более низкой производительности или частичной загрузке — рентабельность инвестиций остается на высоком уровне в течение шести месяцев, подтверждая экономическую целесообразность системы для малых и средних предприятий.

За один год работы (240 000 отверстий) совокупная экономия достигла долларов США, значительно превысив первоначальную стоимость. Для установок с несколькими машинами экономический эффект масштабируется линейно, обеспечивая привлекательную отдачу для производственных мастерских и образовательных центров, внедряющих эту технологию.  $240,000 \times 0.11 = 26,400$

## 6.3 Экологические и энергетические аспекты

Помимо прямых финансовых выгод, оптимизированный процесс также вносит значительный вклад в устойчивое производство за счет снижения потребления энергии и ресурсов.

### 6.4.1 Энергоэффективность

Расход энергии на отверстие определяется как:  $E_h$

$$E_h = \frac{P_s \times t_{cycle}}{3600} \quad (6.9)$$



где – мощность шпинделя (кВт).  $P_s$

Для шпинделя мощностью 3 кВт:

$$\text{Традиционный процесс (12 с): кВтч. } E_h = \frac{3 \times 12}{3600} = 0.010$$

$$\text{Оптимизированный процесс (8 с): кВтч. } E_h = 0.008$$

Это приводит к экономии энергии на 15–20% на отверстие, в первую очередь за счет сокращения времени обработки и повышения эффективности эвакуации стружки. Более 100 000 отверстий эквивалентны экономии 200 кВтч, что соответствует примерно 30 долларам США снижения затрат на электроэнергию и снижению выбросов CO<sub>2</sub> на 140 кг (при условии 0,7 кг CO<sub>2</sub>/кВтч).

Внедрение минимального количества смазки вместо проточного охлаждения значительно снижает расход охлаждающей жидкости. В обычной системе заводнения обычно используется 20–30 л/ч эмульсии, в то время как для MQL требуется всего 5–10 мл/ч масляного тумана, что означает сокращение расхода жидкости на 90–95%.

Это не только снижает эксплуатационные расходы, но и сводит к минимуму потребность в фильтрации, переработке и утилизации охлаждающей жидкости, что влечет за собой экологические расходы и расходы на техническое обслуживание. Кроме того, MQL устраняет разбрызгивание жидкости и загрязнение туманом в рабочей зоне, повышая безопасность и чистоту оператора.

Снижение износа инструмента и процента брака напрямую снижает отходы материала. В оптимизированном процессе меньшее количество бракованных деталей означает экономию сырья и усилий на обработке. Кроме того, твердосплавные сверла и сверла из быстрорежущей стали служат дольше, что снижает частоту замены инструмента и связанные с этим перерывы в производстве.

Таблица 6.3 – Сравнение традиционного ЧПУ и оптимизированного

Аспект	Традиционный	Оптимизированный ЧПУ + ДСМ	Улучшение
Расход энергии на отверстие	0,010 кВтч	0,008 кВтч	–20%
Расход охлаждающей жидкости	25 л/ч	0,02 л/ч	–99%
Замена инструмента в год	600	250	–58%
Брак деталей	4%	1%	–75%
Выбросы CO <sub>2</sub> (на 100 тыс. отверстий)	700 кг	560 кг	–20%

Экологические преимущества соответствуют принципам экологичной обработки и целям устойчивого развития Индустрии 4.0, сочетая оптимизацию процессов с экологической ответственностью.

Проведенный анализ затрат и выгод подтверждает, что интеграция дополнительного сверлильного модуля в стандартные станки с ЧПУ экономически оправдана и экологически выгодна. Система предлагает:

- снижение общей стоимости сверления на 24–30%,
- до 3× увеличение стойкости инструмента,
- сокращение времени обработки на 25–30%,
- значительная экономия энергии и ресурсов.

Учитывая быстрый срок окупаемости (менее шести месяцев), низкую стоимость производства и измеримые улучшения устойчивости, разработанный ДСМ представляет собой практичное и выгодное усовершенствование традиционной обработки с ЧПУ. Он поддерживает переход к гибким, интеллектуальным и экологически эффективным производственным системам, в которых производительность и рациональное использование окружающей среды сосуществуют в балансе [16].



## 7. Оценка качества интеграции

### 7.1 Сравнительная оценка результатов

Сравнительная оценка теоретических, смоделированных и экспериментальных результатов позволяет получить комплексное представление о производительности оптимизированного процесса сверления и дополнительного бурового модуля (ДСМ).

Теоретические прогнозы, полученные на основе эмпирических силовых моделей Кинцле и уравнений теплопередачи (глава III), показали, что осевая сила для твердосплавного сверла Ø8 мм из стали С45 должна находиться в диапазоне 420–480 Н, а крутящий момент — в диапазоне 0,45–0,55 Н·м при подаче 0,1–0,12 мм/об. Экспериментальные измерения подтвердили эти оценки со средними значениями 450 Н и 0,48 Н·м, что указывает на отклонение менее 7%, что подтверждает точность аналитической модели.

Аналогичным образом, температурная модель предсказывала температуру границы раздела примерно 700 °С при сухом бурении и 480 °С при MQL. Измерения термпар зафиксировали 710 °С и 475 °С соответственно, показав отличную корреляцию с максимальной погрешностью ниже 3%.

Моделирование структуры ДСМ по методу конечных элементов МКЭ также тесно связано с реальными характеристиками. Моделирование предсказывало прогиб наконечника шпинделя на 0,018 мм при нагрузке 300 Н; Экспериментальное смещение, измеренное с помощью циферблатного индикатора, составило 0,019 мм, что свидетельствует о том, что модель жесткости конструкции точно отражает физическое поведение.

В целом, эти результаты подтверждают, что теоретическая основа, математические модели и предположения симуляции были хорошо обоснованы и могут надежно предсказывать результаты процессов. Незначительные расхождения могут быть связаны с изменчивостью материала, износом инструмента и реальной динамикой обработки, такой как микровибрация или небольшое биение инструмента.

Несмотря на сильную согласованность между теоретическими и измеренными данными, определенные систематические и случайные ошибки влияли на точность и воспроизводимость. К основным источникам ошибок относятся:

Биевание инструмента: Незначительный эксцентриситет 5–10 мкм в державке приводил к неравномерной нагрузке стружки на режущие кромки, что приводило к небольшим колебаниям диаметра отверстия ( $\Delta D \approx 0,005$  мм).

Тепловое расширение: При длительной работе нагрев шпинделя и приспособления вызывал небольшой рост заготовки (0,01–0,015 мм по длине 100 мм), что влияло на постоянство глубины.

Дрейф калибровки датчика: динамометр и термопары показали дрейф  $\pm 1,5\%$  после длительных сеансов измерения.

Пропускание вибрации: Остаточные вибрации шпинделя, особенно на высоких скоростях ( $>10\ 000$  об/мин), индуцированные локализованной микровибрацией, обнаруживаемой в спектрах БПФ, но не видимой при измерениях шероховатости поверхности.

Люфт и упругая деформация: Хотя шарико-винтовые передачи ДСМ сводили к минимуму люфт, микроупругий прогиб при ускорении вызывал небольшую нелинейность подачи.

Количественно эти комбинированные эффекты привели к общей погрешности измерения в  $\pm 0,02$  мм для диаметра отверстия и  $\pm 0,05$  мкм для шероховатости. Тем не менее, процесс сохранил точность размеров в пределах IT8 и шероховатость поверхности ниже  $R_a\ 1,2$  мкм, что подтверждает высокую надежность процесса.

Стабильность процесса оценивалась путем анализа кривых сила-время, температурных профилей и амплитуд вибрации в последовательных отверстиях. Для оптимизированных условий (120 м/мин, 0,10 мм/об, охлаждение MQL) как тяга, так и крутящий момент стабилизировались после первых 2–3 отверстий, что указывает на установившиеся условия резания.

Коэффициент повторяемости ( $C_r$ ), определяемый как отношение среднего к стандартному отклонению для измерений диаметра и  $R_a$ , превысил 0,94, что свидетельствует об отличной согласованности. Повторяемость позиционирования ДСМ была подтверждена в ходе многочисленных испытаний на юстировку — отклонение между повторяющимися горизонтальными отверстиями оставалось ниже 0,02 мм.

Интеграция смазки MQL значительно повысила стабильность, предотвратив образование наростов на кромке и сохранив однородную морфологию стружки. По сравнению с сухим сверлением, MQL снижает изменчивость износа инструмента на 35%, увеличивая прогнозируемую стойкость инструмента.

Спектры колебаний оставались стабильными, с пиковой амплитудой  $<1,0$  g RMS в доминирующей полосе частот (200–250 Гц), значительно ниже резонансного порога (385 Гц). Это подтвердило, что в конструкции ДСМ достигнута механическая изоляция от основного шпинделя с ЧПУ и предотвращены эффекты сцепления.

## **7.2 Ограничения горизонтального модуля и возможности автоматизации**

Несмотря на то, что прототип ДСМ продемонстрировал высокую функциональность и измеримые преимущества в производительности, было выявлено несколько ограничений, которые могут быть устранены:



Шаговое управление с разомкнутым контуром: В текущей системе отсутствует обратная связь с обратной связью с обратной связью, что означает, что ошибки позиционирования из-за пропущенных шагов не могут быть автоматически исправлены. Интеграция энкодеров позволит полностью контролировать движение с обратной связью и адаптивную коррекцию.

Ручная калибровка: ДСМ требует ручного обнуления и юстировки во время установки. Автоматизация синхронизации координат с глобальной системой координат ЧПУ с помощью измерительных щупов или лазерной юстировки повысит точность и сократит время наладки.

Ограниченная масштабируемость мощности шпинделя: В то время как шпиндель мощностью 3 кВт достаточен для небольших и средних отверстий, для больших диаметров ( $>13$  мм) или более твердых материалов может потребоваться более высокий крутящий момент или шпиндели с сервоприводом.

Тепловая компенсация: Отсутствует активная компенсация температурного дрейфа в алюминиевой раме. Внедрение датчиков температуры в режиме может обеспечить адаптивную коррекцию теплового расширения.

Отсутствие встроенного регулирования нагрузки: хотя мониторинг крутящего момента был смоделирован, он не был реализован в прототипе оборудования. Измерение нагрузки в режиме реального времени может обеспечить динамическую регулировку скорости подачи для предотвращения отказа инструмента.

Несмотря на эти ограничения, модульная система продольных горизонтальных отверстий предоставляет универсальную платформу для дальнейшей автоматизации и цифровизации. Внедрив датчики и интеллектуальные алгоритмы управления, она может превратиться в полуавтономную подсистему, способную к адаптивному бурению, автоматической коррекции ошибок и оптимизации процессов без ручного вмешательства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом исследовании всесторонне рассматривались вопросы разработки и оптимизации технологий сквозного сверления отверстий на станках с ЧПУ, кульминацией которых стало создание и валидация нового вспомогательного горизонтального сверлильного модуля, предназначенного для повышения функциональности и производительности стандартных вертикальных систем ЧПУ. Проект объединил теоретическое моделирование, экспериментальную проверку и практическое инженерное проектирование в единую целостную структуру.

Основные итоги исследования можно резюмировать следующим образом:

Оптимизированный процесс сквозного сверления был разработан на основе комбинации аналитического моделирования, факторных экспериментов и статистической оптимизации. В ходе исследования были определены оптимальные диапазоны скоростей резания (100–160 м/мин), подачи (0,08–0,14 мм/об) и условий подачи СОЖ (MQL или затопление) для различных материалов, включая сталь С45, алюминий 6061 и композиты из стекловолокна. Эти режимы обеспечивают баланс между производительностью, качеством поверхности и стойкостью инструмента.

Были созданы и проверены эмпирические модели, связывающие параметры процесса и качественные результаты. Регрессионный анализ и анализ ANOVA выявили надежные математические связи между скоростью резания, подачей, состоянием СОЖ и выходными показателями, такими как шероховатость поверхности ( $R_a$ ), отклонение отверстия ( $\Delta D$ ) и износ инструмента ( $V_B$ ). Точность прогнозирования моделей превысила 90%, что подтверждает их пригодность для интеграции в САМ и системы управления технологическими процессами.

Был спроектирован, смоделирован и испытан функциональный вспомогательный модуль горизонтального сверления (ДСМ). ДСМ позволяет выполнять горизонтальное и угловое сверление на стандартных трехосевых станках с ЧПУ без повторного зажима заготовки. Модуль оснащен рабочим пространством  $200 \times 200 \times 200$  мм, шаговым шаро-винтовым движением и коммуникационным интерфейсом на основе USB или G-кода. Он работает в двух конфигурациях:

- промышленная версия со шпинделем мощностью 3 кВт для производственных условий, и
- недорогая версия с использованием стандартной магазинной дрели 220 В для учебных или опытных применений.

Точность позиционирования модуля составила  $\pm 0,01$  мм, погрешность выравнивания отверстий менее 0,02 мм, а жесткость конструкции обеспечивала прогиб  $\leq 0,018$  мм при нагрузке 300 Н. Эти параметры удовлетворяют требованиям уровней точности ISO IT8–IT9 для общемашиностроительных узлов.



Экспериментальная валидация подтвердила значительные усовершенствования процесса. Оптимизированный процесс позволил сократить время цикла на 20–30%, повысить стойкость инструмента на 40% и снизить затраты на отверстие на 24% по сравнению с обычным вертикальным сверлением. Совместное использование охлаждения MQL и стабильного механизма подачи ДСМ улучшило качество поверхности и стабильность размеров при минимизации образования заусенцев.

Экономический анализ показал быструю окупаемость — менее полугода, что делает технологию привлекательной для малого и среднего бизнеса. Потребление энергии снизилось на 15%, а использование охлаждающей жидкости — более чем на 90%, что способствовало устойчивому и экологически ответственному производству.

В заключение следует отметить, что предложенная система успешно объединяет теоретическое моделирование, оптимизацию процессов и модульное проектирование оборудования, создавая практичное и экономичное решение для сложных операций по обработке отверстий.

Исследование способствует научному пониманию механики обработки отверстий, оптимизации и адаптивного проектирования процессов при обработке на станках с ЧПУ. С теоретической точки зрения, он дополняет существующий объем знаний несколькими способами:

Он валидирует силовую модель Кинцле и уравнения теплопередачи при различных режимах смазки, подтверждая их применимость к современным условиям высокоскоростного сверления.

В нем показано, как методы статистического моделирования, в частности проектирование Тагучи и RSM, могут быть эффективно объединены с эмпирическими данными для создания надежных прогностических уравнений для многопараметрической оптимизации.

Он устанавливает количественную корреляцию между тепловыми эффектами, износом инструмента и отклонением размеров, выделяя температуру как критический фактор в прецизионном сверлении.

С практической и инженерной точки зрения результаты исследования имеют непосредственное промышленное значение:

Дополнительный сверлильный модуль представляет собой недорогую, легко технологичную альтернативу многоосевым обрабатывающим центрам, расширяя универсальность существующего оборудования с ЧПУ.

Интеграция USB /G-кода системы обеспечивает совместимость с распространенными контроллерами, такими как Fanuc, Siemens и Mach3, что способствует немедленному внедрению без модификации оборудования.

Использование электроники с открытым исходным кодом (управление на основе Arduino) стимулирует дальнейшие исследования, настройку и образовательное развертывание.

Результаты демонстрируют измеримое повышение эффективности производства, стабильности качества и эффективности использования

ресурсов в соответствии с современными принципами бережливого и экологичного производства.

В промышленном контексте внедрение оптимизированного процесса сверления может повысить пропускную способность, сократить время наладки и повысить гибкость при производстве сложных деталей с пересекающимися отверстиями, таких как гидравлические коллекторы, корпуса редукторов или кронштейны рамы.

ДСМ также открывает новые возможности для многоориентированной обработки, позволяя сверлить, нарезать резьбу или развертывать под переменным углом с помощью простых команд программирования. Его модульность делает его применимым не только к обрабатывающим центрам с ЧПУ, но и к роботизированным производственным ячейкам, исследовательским лабораториям и учебным заведениям.

Для практического развертывания разработанной системы предлагаются следующие рекомендации:

#### Процедура интеграции:

Перед установкой откалибруйте систему координат ДСМ относительно стола с ЧПУ с помощью стандартного кромкоискателя или лазерного датчика для выравнивания. Установите пользовательские М-коды М71–М73 в постпроцессоре ЧПУ для управления активацией и синхронизацией модулей.

#### Рабочие параметры:

Применяйте скорость резания в диапазоне от 100–150 м/мин для стали до 140–160 м/мин для алюминиевых сплавов с подачей 0,10–0,14 мм/об. Используйте MQL или воздушное охлаждение под высоким давлением для наилучшего качества поверхности и долговечности инструмента.

#### Техническое обслуживание и калибровка:

Смазывайте шарико-винтовые механизмы через каждые 50 часов работы.

Ежемесячно проверяйте люфт и выравнивание с помощью циферблатных индикаторов.

Повторная калибровка конечных выключателей и исходных положений после каждой разборки.

#### Безопасность и надежность:

Установите заблокированные защитные ограждения и обеспечьте надлежащее заземление силовой линии шпинделя. Последовательная интеграция схемы аварийного останова ДСМ с аварийным остановом ЧПУ для унифицированного реагирования на угрозы безопасности.

#### Цифровая интеграция:

Для сложных производственных сред подключите ДСМ к панели мониторинга на базе ПК. Записывайте крутящий момент, частоту вращения шпинделя и скорость подачи для определения оптимальных режимов и прогнозирования износа инструмента. Такие данные впоследствии могут поддерживать оптимизацию на основе машинного обучения.

#### Экономичное использование:



Небольшие производители могут развернуть один блок ДСМ на станок с ЧПУ для немедленного повышения производительности. При начальной стоимости около 400 долларов и экономии 0,11 доллара на отверстие, ожидаемый годовой экономический эффект превышает 25 000 долларов – 13 млн тенге для среднесерийного производства.

Масштабируемость и настройка:

Дизайн может быть масштабирован для больших или меньших рабочих зон, в зависимости от размера машины и производственных потребностей. Открытая аппаратная и программная архитектура позволяет интегрировать дополнительные датчики (температуры, крутящего момента, вибрации) для обеспечения адаптивного управления.

Исследование успешно продемонстрировало, что интеграция оптимизированных методологий сверления с модульными мехатронными системами может значительно повысить производительность традиционных станков с ЧПУ. Недавно разработанный дополнительный сверлильный модуль является не просто вспомогательным устройством, а преобразующим компонентом, который расширяет возможности машины, снижает затраты и поддерживает устойчивое производство.

Преодолевая разрыв между теоретическим моделированием, цифровым управлением и физической реализацией, эта работа вносит свой вклад в более широкое видение гибких, интеллектуальных производственных систем. Он обеспечивает как академическую основу, так и практический прототип, необходимый для будущих инноваций в области обработки отверстий на основе ЧПУ и адаптивной обработки.

Представленные результаты служат основой для дальнейших исследований в области киберфизической интеграции, сверления с использованием искусственного интеллекта и автономных обрабатывающих ячеек, что знаменует собой важный шаг на пути к реализации полностью цифровых, энергоэффективных и интеллектуальных производственных экосистем.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 [https://www.rinscom.com/articles/raschet-rezhimov-rezaniya/?srsltid=AfmBOopUzjQB5p1lFejVIqzx4J5RltMYccajA\\_CWhupT49lpT\\_HtHv-3#p9](https://www.rinscom.com/articles/raschet-rezhimov-rezaniya/?srsltid=AfmBOopUzjQB5p1lFejVIqzx4J5RltMYccajA_CWhupT49lpT_HtHv-3#p9)
- 2 И.Т. Глебов ОБОРУДОВАНИЕ ОТРАСЛИ СВЕРЛЕНИЕ ОТВЕРСТИЙ НА СТАНКЕ С ЧПУ, Екатеринбург 2018  
[https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/7821/1/Glebov\\_18\\_6.pdf](https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/7821/1/Glebov_18_6.pdf)
- 3 Fundamentals of CNC Machining A Practical Guide for Beginners – Autodesk guide  
[https://academy.titansofcnc.com/files/Fundamentals\\_of\\_CNC\\_Machining.pdf](https://academy.titansofcnc.com/files/Fundamentals_of_CNC_Machining.pdf)
- 4 Sriranga V Deshpande, P U Karthik, Naveen Kumar D, Dr Vijendra Kumar, Dr K. S Badrinaryan “Design and fabrication of 3-axis CNC Milling machine” International Journal of Engineering Research and General Science Volume 6, Issue 4, July-August, 2018, ISSN2091-2730  
[https://www.researchgate.net/publication/357810780\\_Design\\_and\\_Manufacturing\\_of\\_a\\_3-Axis\\_CNC\\_Drilling\\_Machine\\_for\\_Small\\_Scale\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/357810780_Design_and_Manufacturing_of_a_3-Axis_CNC_Drilling_Machine_for_Small_Scale_Applications)
- 5 K. Nagai, "Learning while doing: Practical robotics education", IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 8, pp. 38- 43, June 2001.  
<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/8/2957>
- 6 N. Raju, N. Beedu, N. Lakshminarasamma, and V. Ramanarayanan, "A do-it-yourself (DIY) switched mode power Conversion laboratory", Proc. India Int. Conf. Power Electronics, Chennai, pp. 289-292, 2006.  
[https://www.academia.edu/35342581/ELECTRONIC\\_PEN\\_AND\\_CNC\\_MACHINE\\_SURVEY](https://www.academia.edu/35342581/ELECTRONIC_PEN_AND_CNC_MACHINE_SURVEY)
- 7 V. K. Pabolu and K.N.H. Srinivas, "Design and implementation of a three-dimensional CNC machine", Int. J. Computer Science and Engineering, vol. 2, pp. 2567-2570, 2010
- 8 T. Andrei and I. Nae, "Practical applications performed by a stepper motor CNC router", SeriaTechica, vol. LXII, pp. 127- 138, 2010.  
<https://ru.scribd.com/document/929486860/1>
- 9 L. Nae and T. Andrei, "Designing and building a CNC router using stepper motors", SeriaTechnica, vo. LXII, pp. 55-62, 2010.  
[https://www.researchgate.net/publication/357810780\\_Design\\_and\\_Manufacturing\\_of\\_a\\_3-Axis\\_CNC\\_Drilling\\_Machine\\_for\\_Small\\_Scale\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/357810780_Design_and_Manufacturing_of_a_3-Axis_CNC_Drilling_Machine_for_Small_Scale_Applications)
- 10 Pahole, L. Rataj, M. Ficko, S. Klancnik, S. Brezovnik, M. Brezocnik, and J. Balic, "Construction and evaluation of lowcost table CNC milling machine", Scientific Bullet Series C: Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology, vol. XXIII, pp. 1-7, 2009.
- 11 Graham T. Smith CNC Machining Technology Volume II Cutting, Fluids and Workholding Technologies  
<https://www.zlibrary.to/dl/cnc-machining-technology-volume-ii-cutting-fluids-and-workholding-technologies>



12 Tool Path Optimization for Computer Numerical Control Machines based on Parallel ACO , Engineering Letters, 20:1, EL\_20\_1\_13.

<https://www.iiste.org/Journals/index.php/ISDE/article/viewFile/10481/10676>

13 Ahmet Murat PINAR, Abdulkadir G"ULL"U, (2005), Minimization of CNC Part Programs in a Vertical Machining Center in Terms of Tool Path and Cutting Parameter Criteria, Turkish J. Eng. Env. Sci. , Gazi University, Technical Education Faculty, Ankara-TURKEY.

14 Majid Tolouei-Rad, (2011), Efficient CNC Milling by Adjusting Material Removal Rate ,World Academy of

[https://www.researchgate.net/publication/343860952\\_Prediction\\_of\\_material\\_removal\\_rate\\_in\\_turning\\_using\\_Response\\_Surface\\_Method](https://www.researchgate.net/publication/343860952_Prediction_of_material_removal_rate_in_turning_using_Response_Surface_Method)

15 Science, Engineering and Technology.

16 Rajesh Matai, Surya Prakash Singh and Murari Lal Mittal, (2010), Traveling Salesman Problem: An Overview of Applications, Formulations, and Solution Approaches Management Group, BITS-Pilani, Department of Mechanical Engineering, Malviya National Institute of Technology Jaipur, India.

[https://cdn.intechopen.com/pdfs/12736/intechtraveling\\_salesman\\_problem\\_an\\_overview\\_of\\_applications\\_formulations\\_and\\_solution\\_approaches.pdf](https://cdn.intechopen.com/pdfs/12736/intechtraveling_salesman_problem_an_overview_of_applications_formulations_and_solution_approaches.pdf)