

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Факультет: Профессионального образования

Направление: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: Автоматизированный электропривод и робототехнические комплексы

Кафедра: Общенаучных дисциплин

Доцент с и.о. зав кафедрой ОНД

_____ К.В. Кондратьева

« 19 » июня 2026 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

на тему:

«Модернизация электропривода подачи токарного станка 1К62»

Студент: _____ В. Ю. Кузнецов
(подпись, дата)

Группа: АЭП-21-1603

Состав ВКР:

1. Пояснительная записка на 49 стр.
2. Графическая часть на 3 листах
3. Электронный носитель с материалами ВКР

Руководитель: _____ ст. преподаватель С. А. Нечаев
(подпись, дата)

Проверено

на наличие

заимствования: _____ канд. экон. наук, доцент, К.В. Кондратьева
(подпись, дата)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Факультет: Профессионального образования

Направление: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: Автоматизированный электропривод и робототехнические комплексы

Кафедра: Общенаучных дисциплин

Доцент с и.о. зав кафедрой ОНД

_____ К.В. Кондратьева

« 03 » марта 2026 г.

ЗАДАНИЕ **на выпускную квалификационную работу**

Фамилия, имя, отчество Кузнецов Вячеслав Юрьевич

Группа: АЭП-21-1бозЛФ

Начало выполнения работы: 05 февраля 2026 г.

Срок предоставления на кафедру: 11 июня 2026 года

Защита работы на заседании ГЭК: 22 июня 2026 года

1. Выпускная квалификационная работа на тему: «Модернизация электропривода подачи токарного станка 1К62».

2. Исходные данные к работе: технические характеристики установки (оборудования), электропривода, устройств, входящих в состав проекта. Учебная и техническая литература, сайты по автоматизированному электроприводу типовых производственных механизмов и технологических комплексов, автоматизации технологических процессов.

3. Содержание пояснительной записки:

а) Введение. Отразить состояние и актуальность представляемой темы, сформулирована цель и конкретные задачи исследований. Также конкретизировать объект и предмет исследований, принцип его работы. Определить методы исследований и значимость работы для теории и практики, непосредственно для конкретного производства. В краткой форме сформулировать необходимость разработки данной темы, указать текущее состояние разрабатываемой темы, к какой области науки и техники относится выполняемая работа. Описать требования, предъявляемые к безопасности труда.

Общий объём до 5 страниц.

б) Основная часть:

Исследовательский раздел. Изучение и анализ нормативно-правовых документов и теоретических вопросов, состояние дел в избранной предметной области на основе

анализа литературных источников, обоснование принятых решений. В данный раздел включить:

- 1) Общее описание установки (оборудования) в которой применяется электропривод, её технические характеристики;
- 2) Определение круга решаемых задач, связанных с регулированием технологических параметров;
- 3) Меры безопасности при эксплуатации установки (оборудования), электропривода;
- 4) Состав, устройство и работа установки и ее основных частей .
- 5) Управление и блокировки;
- 6) Работа электрооборудования;
- 7) Определение особенностей и проблем системы управления и электропривода,
- 8) Подходы к построению современной системы регулирования: управление, контроль параметров, поддержание безопасных условий работы;

Объем от 15 до 30 страниц. В конце раздела должны быть сделаны краткие выводы.

в) Технологический (конструкторский) раздел. В данном разделе выполнить сам проект, а именно:

- 1) Выбор и обоснование выбора электрооборудования;
- 2) Разработка структурной и функциональной схемы автоматизации;
- 3) Разработка структурной и принципиальной электрической схем установки;
- 4) Разработка системы управления;
- 5) Разработка связи между отдельными элементами, связь с электроприводом;
- 6) Описание работы разработанной схемы;
- 7) Сделать выводы о проделанной работе.

Объём от 15 до 30 страниц.

Заключение. Краткое изложение решаемых в рамках ВКР задач и полученных результатов, практическая значимость работы для исследуемого объекта, соответствие полученных результатов теме и заданию ВКР. Определить значимость проделанной работы для дальнейшего её использования. Объем до 1,5 страниц.

4. Перечень графического материала.
 - 4.1. Внешний вид установки (оборудования);
 - 4.2. Схема электрическая принципиальная до модернизации;
 - 4.3. Схема электрическая принципиальная после модернизации;
 - 4.4. Схема электрическая структурная;

5. Дополнительные указания: нет

6. Основная литература

6.1 ГОСТ 12.2.009-99. Система стандартов безопасности труда. Станки металлообрабатывающие. Общие требования безопасности. — М.: Стандартинформ, 2000. — 18 с.

6.2 ГОСТ 12.1.030-81. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление. — М.: Издательство стандартов, 1981.

- 6.3 Свешников В.К., Усов А.А. Станочные гидроприводы: Справочник. — 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 2019. — 456 с.
- 6.4 Москалев И.Е. Электрооборудование станков с ЧПУ. — М.: Академия, 2017. — 208 с.
- 6.5 Бушуев В.В., Кузнецов А.П. Металлорежущие станки: учебник для вузов. В 2 т. Т.1. — М.: Машиностроение, 2020. — 608 с.
- 6.6 Кенно Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 2019. — 192 с.
- 6.7 Руководство по эксплуатации станка токарно-винторезного 1K62. — М.: Станкостроительный завод «Красный пролетарий», 1985. — 120 с.
- 6.8 Технический паспорт на шаговый двигатель FL86STH118-6008. — Changzhou Fuyu Electromechanical Co., Ltd, 2023.
- 6.9 Руководство пользователя программного обеспечения Mach3. — ArtSoft Inc., 2020.
- 6.10 Инструкция по эксплуатации частотного преобразователя серии GD200A. — Shenzhen Inovance Technology Co., Ltd, 2022.
- 6.11 Петров И.В. Модернизация токарных станков с установкой ЧПУ // Журнал «САПР и графика». — 2022. — №5. — С. 34-38.
- 6.12 Форум сообщества ЧПУ-энтузиастов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cnc-club.ru>, свободный (дата обращения: 15.05.2026).

Руководитель ВКР _____ ст. преподаватель С. А. Нечаев
(подпись, дата)

Задание получил _____ В. Ю. Кузнецов
(подпись, дата)

КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

№ п/п	Содержание разделов	Объем этапа, в %	Срок выполнения		Подпись научного руководителя
			начало	конец	
	Введение	5/5	10.02.2026	03.03.2026	
1.	Исследовательский раздел	35/40	23.02.2026	24.04.2026	
1.1.	Постановка задачи проектирования	5/10	23.02.2026	13.03.2026	
1.2.	Определение круга решаемых задач	20/25	13.03.2026	24.03.2026	
1.3	Детальное рассмотрение работы элементов и составных частей	35/40	24.03.2026	04.04.2026	
2.	Технологический (конструкторский) раздел	50/90	24.04.2026	14.06.2026	
2.1.	Разработка механической схемы	10/50	24.04.2026	08.05.2026	
2.2.	Разработка принципиальной электрической схемы	25/65	08.05.2026	18.05.2026	
2.3	Реализация поставленных задач и сравнение полученных результатов с известными техническими решениями	50/90	18.05.2026	05.06.2026	
	Заключение	2/92	06.06.2026	07.06.2026	
	Список использованных источников	1/93	08.06.2026	09.06.2026	
	Оформление ВКР	2/95	09.06.2026	10.05.2026	
	Представление ВКР на проверку и отзыв научному руководителю		09.06.2026	10.06.2026	
	Представление ВКР на проверку заведующему кафедрой		09.06.2026	10.06.2026	
	Защита ВКР на заседании ГЭК	5/100	22.06.2026	23.06.2026	

Руководитель ВКР _____ Ст. преподаватель С. А. Нечаев
«10» июня 2026 г.

Задание получил _____ В. Ю. Кузнецов
«05» февраля 2026 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме: «Модернизация токарно-винторезного станка 1К62».

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников из 12 наименований и 3 приложений. Работа изложена на 48 листах печатного текста, содержит 3 таблиц и 8 рисунков.

Целью данной ВКР является разработка технического и экономически обоснованного проекта модернизации станка 1К62, включающего замену ручного привода подач на систему ЧПУ с шаговыми двигателями, установку частотно-регулируемого привода шпинделя и автоматической револьверной головки.

В соответствии с целью, в работе решаются следующие задачи:

- выполнен анализ конструкции станка 1К62 и кинематический расчёт приводов подач;
- произведён силовой расчёт и выбор шаговых двигателей NEMA 34 (18 Н·м), драйверов DM860T и частотного преобразователя 15 кВт;
- обоснован выбор автоматической револьверной головки XWD100-6 (6 позиций, сервопривод);
- разработана структурная и принципиальная электрическая схема системы управления на базе контроллера CNC USB Controller и ПО Mach3 [9];
- составлены алгоритмы смены инструмента и обработки аварийных ситуаций;
- выполнено экономическое обоснование с расчётом сметы затрат (265 тыс. руб.) и срока окупаемости (менее 7 месяцев).

При написании работы были рассмотрены принципы работы шаговых двигателей [6], методы их расчёта для металлорежущих станков [5], а также вопросы интеграции револьверной головки с сервоприводом в систему ЧПУ. Описаны технические характеристики выбранных компонентов и приведены рекомендации по пусконаладке.

Ключевые слова: МОДЕРНИЗАЦИЯ СТАНКА, ШАГОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ЧПУ, РЕВОЛЬВЕРНАЯ ГОЛОВКА XWD100-6, ЧАСТОТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, МАСНЗ, ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ, ТОКАРНЫЙ СТАНОК 1К62.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ШАГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ	14
1.1 Принцип действия и классификация шаговых двигателей	14
1.2 Основные параметры и характеристики шаговых двигателей	15
1.3 Системы управления шаговыми двигателями	17
1.4 Сравнительный анализ шаговых двигателей и сервоприводов	17
1.5 Области применения шаговых двигателей в машиностроении	19
ГЛАВА 2 РАСЧЕТ И ВЫБОР СИЛОВЫХ ПРИВОДОВ И КОМПОНЕНТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ	20
2.1 Исходные данные для расчета и анализ объекта модернизации	20
2.2 Детальный расчет и выбор приводов подач	21
2.2.1 Кинематический расчет	21
2.2.2 Силовой расчет требуемого крутящего момента	22
2.2.3 Выбор шаговых двигателей и драйверов	25
2.3 Расчет и выбор привода шпинделя	28
2.4 Выбор автоматической револьверной головки	30
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗИРОВАННЫМ СТАНКОМ	32
3.1 Разработка структурной схемы системы ЧПУ	32
3.2 Выбор и обоснование компонентов системы управления	33
3.2.1 Выбор контроллера ЧПУ	33
3.2.2 Выбор программного обеспечения	35
3.3 Разработка принципиальной электрической схемы	36
3.4 Настройка программного обеспечения и параметров системы	37
3.5 Алгоритмы управления дополнительными функциями	39
3.5.1 Алгоритм смены инструмента	39
3.5.2 Алгоритм обработки аварийных ситуаций	39
ГЛАВА 4 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТА	

МОДЕРНИЗАЦИИ	41
4.1 Расчет капитальных затрат на модернизацию	41
4.2 Сравнительный анализ альтернативных вариантов	42
4.3 Расчет экономической эффективности и срока окупаемости	42
4.3.1 Расчет дополнительной прибыли	42
4.3.2 Расчет эксплуатационных затрат	42
4.3.3 Расчет срока окупаемости	42
4.4 Качественные (нефинансовые) преимущества проекта	42
4.5 Оценка рисков проекта	43
4.6 Выводы по экономическому обоснованию	43
ГЛАВА 5 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОЕКТА	44
5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов	44
5.2 Требования безопасности перед началом работы	44
5.3 Требования безопасности во время работы	44
5.4 Требования безопасности в аварийных ситуациях	44
5.5 Конструктивные мероприятия по обеспечению безопасности	45
5.6 Экологичность проекта	45
5.6.1 Снижение негативного воздействия на окружающую среду	45
5.6.2 Оценка жизненного цикла оборудования	45
5.7 Мероприятия по снижению профессиональных рисков	45
5.8 Заключение по безопасности и экологичности проекта	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	47
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	49

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Современное машиностроение характеризуется непрерывным усложнением выпускаемых изделий, ужесточением требований к точности обработки и необходимостью быстрой переналадки производства. В этих условиях ключевым фактором конкурентоспособности предприятий, особенно малого и среднего бизнеса, становится гибкость и автоматизация технологического оборудования. Наиболее эффективным способом автоматизации процессов металлообработки является применение станков с числовым программным управлением (ЧПУ) [5], которые позволяют изготавливать детали сложной геометрии с высокой точностью и повторяемостью, минимизируя участие оператора.

Однако приобретение нового современного оборудования сопряжено со значительными капитальными затратами. Стоимость нового токарного станка с ЧПУ отечественного или зарубежного производства может составлять от 1,5 до 5 миллионов рублей и выше, что зачастую является неподъемным для небольших производственных мастерских, ремонтных служб предприятий, а также учебных заведений. В то же время на многих предприятиях до сих пор эксплуатируется значительный парк универсальных токарно-винторезных станков, таких как 1К62, 16К20, ТВ-4 и другие [7]. Эти станки, произведенные в советский период, обладают высокой механической жесткостью, износостойкостью и значительным остаточным ресурсом. Их конструкция, основанная на чугунных станинах и качественных направляющих, позволяет выдерживать значительные нагрузки и сохранять точность в течение десятилетий. Однако морально устаревшая система управления (ручное перемещение суппорта, коробка скоростей с ограниченным набором подач) не позволяет реализовать потенциал этой механической базы. Производительность такого станка целиком зависит от квалификации токаря, а изготовление сложных деталей, например, с фасонными поверхностями или многозаходными резьбами, становится

трудоемкой и дорогостоящей задачей, требующей высокой квалификации исполнителя и значительного времени.

Таким образом, возникает объективное противоречие между высоким механическим ресурсом устаревшего оборудования и его низкой производительностью из-за отсутствия автоматизации. Разрешение этого противоречия лежит в плоскости модернизации существующих станков путем оснащения их современными приводами подачи и системами ЧПУ. Данный подход, широко распространенный в мировой практике, позволяет получить станок с характеристиками, приближающимися к современным моделям, при затратах, составляющих лишь 10–30% от стоимости нового оборудования. Модернизация не только продлевает жизненный цикл станка, предотвращая его утилизацию, но и позволяет адаптировать оборудование под конкретные производственные нужды.

В последние десятилетия благодаря развитию силовой электроники и микропроцессорной техники на рынке появились доступные и надежные компоненты для построения систем ЧПУ. Особое место среди них занимают шаговые двигатели (ШД) и драйверы к ним. Благодаря относительно низкой стоимости, высокой надежности, простоте управления и способности развивать большой крутящий момент на низких оборотах, шаговые двигатели стали оптимальным выбором для модернизации приводов подачи тяжелых станков, к которым относится и 1K62. Применение шаговых двигателей в сочетании с современными микропроцессорными контроллерами и программным обеспечением (например, Mach3, LinuxCNC) позволяет создать эффективную и недорогую систему управления, доступную для реализации даже в условиях небольших предприятий или учебных лабораторий.

Проблема исследования. Несмотря на очевидные преимущества модернизации, процесс переоборудования станка, в частности 1K62, сопряжен с рядом технических сложностей. Отсутствие типовых решений, рассчитанных на конкретную модель, требует от разработчика глубокого понимания кинематики станка, методов расчета нагрузок на приводы подачи,

принципов выбора шаговых двигателей и согласования их с механикой станка, а также знаний в области разработки систем управления и программирования. Ошибочный выбор двигателя (недостаточный момент) приведет к пропуску шагов и браку; избыточный момент и габариты — к неоправданным затратам и сложностям компоновки. Неправильная настройка драйверов и программного обеспечения может стать причиной вибраций, резонанса и потери точности. Таким образом, существует потребность в разработке комплексного, научно и практически обоснованного проекта модернизации, который учитывал бы все перечисленные аспекты.

Степень разработанности темы. Вопросы модернизации металлорежущего оборудования широко освещены в технической литературе. Существуют работы, посвященные общим принципам построения систем ЧПУ (Бушуев В.В., Кузнецов А.П.) [5], теории и практике применения шаговых двигателей (Кенно Т., Свешников В.К. [6]), а также отдельные публикации и форумы, описывающие опыт переоборудования станков 1K62 [11, 12]. Однако большинство доступных материалов либо носят слишком общий характер, либо, напротив, являются фрагментарными описаниями конкретных реализаций без должного теоретического обоснования и расчетов. Комплексные работы, объединяющие детальный силовой расчет, выбор всех компонентов (включая привод шпинделя и систему управления), разработку электрических схем и экономическое обоснование применительно к станку 1K62, представлены недостаточно. Данный дипломный проект призван восполнить этот пробел.

Объект исследования. Токарно-винторезный станок модели 1K62 [7], являющийся одним из наиболее массовых и репрезентативных представителей класса универсальных токарных станков.

Предмет исследования. Процесс проектирования системы автоматизированного электропривода подач на основе шаговых двигателей [6] и системы управления главным движением (шпинделем) на основе частотного преобразователя для модернизации токарного станка.

Цель дипломного проекта. Разработка и технико-экономическое обоснование комплексного проекта модернизации токарно-винторезного станка 1К62, предусматривающего замену ручного привода подач на систему ЧПУ на базе шаговых двигателей и оснащение привода главного движения частотным регулированием, с целью повышения производительности, точности и автоматизации процесса обработки деталей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ теоретических основ применения шаговых двигателей в машиностроении. Изучить принципы действия, классификацию, основные характеристики и параметры шаговых двигателей. Выполнить сравнительный анализ шаговых приводов и сервоприводов, обосновав выбор типа привода для решаемой задачи. Рассмотреть современные системы управления шаговыми двигателями (драйверы, контроллеры) и их интерфейсы.

2. Выполнить анализ объекта модернизации — станка 1К62. Изучить его кинематическую схему, определить массы подвижных частей (суппорта, каретки), шаги ходовых винтов, параметры главного двигателя и другие исходные данные, необходимые для инженерных расчетов.

3. Произвести детальный расчет и выбор приводов подач по осям X (поперечная) и Z (продольная).

- Выполнить кинематический расчет для определения необходимого количества шагов на миллиметр перемещения.

- Провести силовой расчет, определив силы трения в направляющих и требуемый крутящий момент на ходовых винтах для преодоления сил резания (включая динамические нагрузки при разгоне).

- На основе выполненных расчетов и с учетом необходимого запаса обоснованно выбрать конкретные модели шаговых двигателей (типоразмер, момент, ток), соответствующие им драйверы и блок питания.

4. Осуществить расчет и выбор привода главного движения (шпинделя). Обосновать отказ от шагового двигателя для шпинделя.

Провести анализ возможных вариантов (сохранение родного двигателя с частотным регулированием, установка сервопривода). Выполнить расчет необходимой мощности частотного преобразователя, выбрать конкретную модель с требуемыми функциями (аналоговое управление 0-10В, цифровые входы).

5. Разработать систему управления модернизированным станком.

- Разработать структурную схему системы ЧПУ, отражающую взаимодействие всех компонентов: персонального компьютера с ПО, контроллера ЧПУ, драйверов шаговых двигателей, частотного преобразователя, револьверной головки, датчиков и элементов безопасности.

- Обосновать выбор контроллера ЧПУ (например, CNC USB Controller или аналога) и программного обеспечения (Mach3).

- Разработать принципиальную электрическую схему подключения всех электронных компонентов, силовых цепей и цепей управления.

- Описать алгоритмы настройки программного обеспечения и параметров драйверов и частотного преобразователя.

- Разработать алгоритмы управления дополнительными функциями (смена инструмента, обработка аварийных ситуаций).

6. Выполнить экономическое обоснование проекта модернизации.

- Составить смету капитальных затрат на приобретение всех необходимых компонентов и материалов.

- Провести сравнительный анализ стоимости предлагаемой модернизации с альтернативными вариантами (покупка нового станка с ЧПУ, приобретение готового комплекта для модернизации).

- Оценить потенциальный экономический эффект от повышения производительности и рассчитать срок окупаемости проекта.

- Выявить качественные (нефинансовые) преимущества предлагаемого решения (повышение гибкости производства, продление срока службы оборудования, приобретение опыта).

7. Проанализировать вопросы безопасности и экологичности проекта.

- Выявить опасные и вредные производственные факторы, возникающие при работе на модернизированном станке.

- Разработать требования безопасности на всех этапах работы (перед началом, во время, в аварийных ситуациях).

- Описать конструктивные мероприятия, заложенные в проект, для обеспечения безопасности (концевые выключатели, кнопка аварийного останова, защитное заземление).

- Дать оценку экологичности проекта с точки зрения продления жизненного цикла оборудования и снижения энергопотребления.

Научная новизна работы. Научная новизна данного дипломного проекта заключается в комплексном подходе к решению задачи модернизации, который выражается в следующем:

- Разработана инженерная методика выбора шаговых двигателей для станка 1К62, учитывающая не только статические нагрузки от сил резания и трения, но и динамические нагрузки при разгоне, а также реальные характеристики двигателей (падение момента с ростом скорости) и КПД передач.

- Впервые для данной модели станка выполнено обоснование унификации приводов подач (установка одинаковых двигателей NEMA 34 на обе оси), позволяющее повысить надежность системы и упростить ее обслуживание.

- Предложена и обоснована архитектура системы управления на базе современного специализированного контроллера и ПО Mach3, обеспечивающая полную автоматизацию цикла обработки, включая управление шпинделем через аналоговый сигнал 0–10В и автоматическую смену инструмента.

Практическая значимость работы. Результаты дипломного проекта имеют выраженную практическую направленность и могут быть использованы:

- В качестве готового технического решения для модернизации станков 1К62 в условиях реальных производственных мастерских или ремонтных

служб. Проект содержит все необходимые расчеты, обоснования выбора компонентов и электрические схемы.

- В учебном процессе технических вузов и колледжей при изучении дисциплин, связанных с автоматизацией технологических процессов, электроприводом и системами ЧПУ. Материалы проекта могут служить основой для выполнения курсовых и дипломных работ.

- Как руководство для индивидуальных предпринимателей и владельцев небольших мастерских, желающих повысить эффективность своего оборудования с минимальными затратами.

Методология и методы исследования. При выполнении работы использовались как теоретические, так и экспериментальные методы исследования:

- Аналитический метод: изучение технической литературы, патентов, руководств по эксплуатации, каталогов производителей.

- Методы теоретической механики и сопротивления материалов: для расчета сил резания, сил трения и моментов инерции.

- Методы электротехники: для расчета параметров электрических цепей, выбора частотного преобразователя и блока питания.

- Методы системного анализа: при разработке структурной схемы и алгоритмов управления.

- Сравнительный анализ: при выборе альтернативных вариантов компонентов и оценке экономической эффективности.

- Экономико-статистические методы: для расчета сметы затрат и срока окупаемости.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты кинематического и силового расчета приводов подачи станка 1K62, обосновывающие выбор шаговых двигателей NEMA 34 с удерживающим моментом не менее 18 Н·м.

2. Обоснование выбора частотного преобразователя мощностью 15 кВт для управления шпинделем с сохранением штатного асинхронного двигателя.

3. Структурная и принципиальная электрические схемы системы управления на базе контроллера CNC USB Controller и ПО Mach3.

4. Экономическое обоснование проекта, подтверждающее его целесообразность и срок окупаемости менее 6 месяцев.

- В первой главе рассматриваются теоретические основы применения шаговых двигателей: принципы действия, классификация, характеристики, системы управления, а также проводится сравнение с сервоприводами.

- Во второй главе выполняется анализ объекта модернизации, детальные кинематические и силовые расчеты приводов подач, расчет и выбор шаговых двигателей, драйверов, блока питания, а также расчет и выбор привода шпинделя и револьверной головки.

- В третьей главе разрабатывается система управления: предлагается структурная схема, обосновывается выбор контроллера и ПО, разрабатывается принципиальная электрическая схема, описываются алгоритмы настройки и управления дополнительными функциями.

- В четвертой главе приводится экономическое обоснование проекта: расчет капитальных затрат, сравнительный анализ альтернатив, расчет экономической эффективности и срока окупаемости, оценка качественных преимуществ и рисков.

- В пятой главе рассматриваются вопросы безопасности и экологичности: анализируются опасные факторы, разрабатываются требования безопасности, описываются конструктивные мероприятия, дается оценка экологичности.

- В заключении формулируются основные выводы и результаты выполненной работы.

- Приложения содержат графические материалы: кинематические схемы, электрические схемы.

ГЛАВА 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ШАГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

1.1 Принцип действия и классификация шаговых двигателей

Шаговый двигатель (ШД) представляет собой синхронную электрическую машину, работа которой основана на дискретном перемещении ротора под действием импульсов напряжения [6], подаваемых на обмотки статора в определённой последовательности. Количество импульсов определяет угол поворота, а частота следования — скорость вращения.

Классификация по конструкции [6]:

1. ШД с переменным магнитным сопротивлением (реактивные):

Ротор выполнен из магнитомягкого материала (электротехническая сталь) и имеет явно выраженные полюсы (зубцы). Магнитный поток создаётся только обмотками статора.

Принцип: ротор стремится занять положение, при котором магнитное сопротивление потоку минимально (зубцы ротора совпадают с зубцами статора).

Достоинства: простота конструкции, низкая стоимость.

Недостатки: малый крутящий момент, низкая точность, склонность к колебаниям.

Применяются в устройствах, не требующих высокого момента (например, в принтерах).

2. ШД с постоянными магнитами:

Ротор представляет собой постоянный магнит (обычно цилиндрический с чередующимися полюсами). Обмотки статора при подаче тока создают магнитное поле, взаимодействующее с полем ротора.

Достоинства: наличие удерживающего момента при отключённом питании (за счёт магнитного сцепления), хороший момент при небольших размерах.

Недостатки: относительно большой угол шага (типовые значения $7,5^\circ$, 15° , 18°), что ограничивает точность позиционирования без микрошага.

Применяются в простых приводах (лентопротяжные механизмы, поворотные устройства).

3. Гибридные шаговые двигатели:

Являются дальнейшим развитием реактивных двигателей и двигателей с постоянными магнитами. Ротор состоит из двух пакетов (чашек) с зубцами, между которыми расположен постоянный магнит, намагниченный вдоль оси. Зубцы одного пакета смещены на половину зубцового деления относительно другого. Статор также имеет многозубчатую структуру.

Принцип: сочетание эффекта переменного магнитного сопротивления и взаимодействия с полем постоянного магнита.

Достоинства: малый угол шага ($1,8^\circ$, $0,9^\circ$), высокий крутящий момент, хорошая плавность хода при использовании микрошага, высокая точность.

Недостатки: более сложная конструкция и управление.

Применение: станки с ЧПУ, промышленные роботы, медицинское оборудование. Именно гибридные ШД являются основным выбором для модернизации металлорежущих станков.

Классификация по схеме подключения обмоток:

Униполярные: имеют отвод от средней точки каждой фазы (или две отдельные обмотки на фазу). Ток в обмотке всегда течёт в одном направлении. Управление проще (требуется простые транзисторные ключи), но при этом используется только половина обмотки, что снижает момент.

Биполярные: не имеют средней точки. Для изменения направления тока требуется H-мост. Используется вся обмотка, поэтому момент выше на 30-40% по сравнению с униполярным режимом того же двигателя. Большинство современных драйверов работают в биполярном режиме.

1.2 Основные параметры и характеристики шаговых двигателей

Для правильного выбора ШД необходимо понимать его статические и динамические характеристики.

Угол шага (Step Angle) — угол поворота ротора при подаче одного импульса переключения фаз. Для гибридных двигателей наиболее распространён угол $1,8^\circ$ (200 шагов на оборот). Двигатели с углом $0,9^\circ$ (400 шагов/об) обеспечивают более высокое разрешение, но обычно имеют меньший момент при тех же габаритах.

Удерживающий момент (Holding Torque) — максимальный статический момент, который двигатель может развить на валу при номинальном токе в обмотках и заторможенном роторе (ротор стремится удержаться в позиции, соответствующей последнему поданному импульсу). Измеряется в Н·м. Этот параметр часто указывается в паспорте, но не является рабочим моментом при вращении.

Момент в динамике (Pull-out Torque) — зависимость крутящего момента от частоты вращения (или скорости в об/мин). Это наиболее важная характеристика, так как с ростом скорости из-за противоЭДС и индуктивности обмоток ток в фазах не успевает достичь номинального значения, и момент падает. График момент-скорость (Torque-Speed Curve) должен быть предоставлен производителем. Выбор двигателя производится так, чтобы требуемый момент при рабочей скорости лежал ниже этой кривой.

Номинальный фазный ток (Phase Current) — ток, при котором достигается номинальный удерживающий момент. Превышение тока может привести к перегреву и размагничиванию ротора. Драйвер должен обеспечивать стабилизацию тока на заданном уровне (обычно с помощью ШИМ).

Индуктивность обмоток (Inductance) — важный параметр, определяющий скорость нарастания тока. Чем выше индуктивность, тем быстрее падает момент с ростом скорости. Для высокоскоростных применений выбирают двигатели с низкой индуктивностью и повышенным рабочим напряжением (для форсирования нарастания тока).

Момент инерции ротора (Rotor Inertia) — влияет на динамику разгона и торможения. Чем больше момент инерции нагрузки, тем больше времени требуется для разгона, и тем выше риск срыва шага при резких ускорениях.

1.3 Системы управления шаговыми двигателями

Современное управление ШД осуществляется специализированными драйверами, которые реализуют следующие функции:

Коммутация фаз в нужной последовательности (полношаговый режим 1/1, 1/2, 1/4 и т.д.);

Стабилизация тока в обмотках методом ШИМ (PWM) для обеспечения постоянного момента независимо от колебаний напряжения питания;

Микрошаговый режим — дробление полного шага на более мелкие дискреты за счёт подачи в обмотки синусоидальных токов со сдвигом фазы. Например, при микрошаге 1/8 один полный шаг ($1,8^\circ$) разбивается на 8 микрошагов по $0,225^\circ$. Это значительно повышает плавность хода и разрешение позиционирования, снижает резонансные явления, но несколько уменьшает максимальный момент. Типовые значения микрошага: 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32.

Защита от перегрева, превышения тока и короткого замыкания.

Управление драйвером обычно осуществляется двумя сигналами от контроллера ЧПУ:

- STEP (шаг) — каждый импульс на этом входе заставляет драйвер выполнить один микрошаг (или шаг в зависимости от настроек).
- DIR (направление) — логический уровень определяет направление вращения.

Некоторые драйверы также поддерживают интерфейсы RS-485, Ethernet или CAN для более сложных систем.

1.4 Сравнительный анализ шаговых двигателей и сервоприводов

Для осей подачи станков также применяются сервоприводы. Проведём их сравнительный анализ в таблице 1.4 применительно к задаче модернизации станка 1К62.

Таблица 1.4 — Сравнение шагового привода и сервопривода

Параметр	Шаговый привод (с разомкнутым контуром)	Сервопривод (с замкнутым контуром)
Система управления	Разомкнутая (нет обратной связи по положению)	Замкнутая (энкодер или резольвер)
Стоимость комплекта (двигатель + драйвер)	Низкая (5-20 тыс. руб. на ось)	Высокая (от 30 тыс. руб. на ось)
Момент на низких оборотах	Высокий, номинальный	Высокий, но требует согласования
Момент на высоких оборотах	Резко падает (ограничен индуктивностью)	Постоянен до номинальных оборотов
Потеря шага (срыв)	Возможна при перегрузке	Отсутствует благодаря обратной связи
Точность позиционирования	Зависит от нагрузки, но в пределах микрошага (0,1-0,01 мм)	Высокая, определяется энкодером
Энергоэффективность	Низкая (ток потребляется даже в статике)	Высокая (ток пропорционален нагрузке)
Шум, вибрации	Присутствуют на низких скоростях	Обычно ниже
Сложность настройки	Низкая (задаётся ток и микрошаг)	Высокая (требуется автонастройка PID)

Вывод для проекта: для модернизации станка 1K62, используемого в условиях малого производства или учебных целях, применение шаговых двигателей является оптимальным по критерию «цена/качество». Значительный запас по моменту (выбранный при расчёте) компенсирует риск срыва шага, а относительно невысокие рабочие скорости подач (до 1000 об/мин на двигателе) соответствуют зоне эффективной работы ШД.

1.5 Области применения шаговых двигателей в машиностроении

Шаговые двигатели находят широкое применение в металлообрабатывающем оборудовании:

- Приводы подач фрезерных и токарных станков с ЧПУ, особенно в настольных и малых станках.
- Устройства автоматической смены инструмента (револьверные головки, магазины инструментов).
- Приводы подачи заготовки в отрезных станках.
- Позиционирующие столы и координатные устройства.
- 3D-принтеры и робототехника.

Благодаря простоте реализации точного позиционирования без обратной связи, шаговые двигатели стали стандартом в любительском и полупрофессиональном станкостроении.

2.1 Исходные данные для расчета и анализ объекта модернизации

Станок 1K62 имеет паспортные данные, которые легли в основу расчётов. Однако для точного определения усилий необходимо также учесть состояние направляющих и винтовой пары. Примем консервативные значения, характерные для станка с умеренным износом.

Основные исходные параметры:

- Масса подвижных частей:

Продольный суппорт (каретка) с фартуком: $m_z = 150$ кг.

Поперечные салазки (верхние) с резцедержателем: $m_x = 50$ кг.

- Шаг винта (оригинальный, ходовой винт):

Для продольной подачи (ось Z): $p_z = 12$ мм/об.

Для поперечной подачи (ось X): $p_x = 5$ мм/об.

- Тип направляющих: чугунные, типа «ласточкин хвост», смазываемые.

- Тип передачи винт-гайка: скольжения (трапецеидальная резьба), с зазором.

- КПД передачи винт-гайка скольжения: $\eta = 0.3$ (с учётом трения и возможного загрязнения).

- Коэффициент трения в направляющих: $\mu = 0.15$ (чугун по чугуну со смазкой).

- Ускорение свободного падения: $g = 9.81$ м/с².

- Максимальная сила резания (тангенциальная составляющая P_z): для черновой обработки стали резцом с пластиной из твёрдого сплава принимаем $P_z = 2000$ Н (с запасом выше паспортного значения, чтобы учесть пиковые нагрузки).

- Скорость быстрых перемещений (желаемая):

для оси Z $V_{fast} = 2$ м/мин, для оси X $V_{fast} = 1$ м/мин.

- Время разгона до максимальной скорости: $t_a = 0.2$ с.

Эти данные позволяют выполнить как статический, так и динамический расчёт.

2.2 Детальный расчет и выбор приводов подачи

2.2.1 Кинематический расчет

Кинематический расчет выполняется для определения требуемого числа шагов двигателя на 1 мм перемещения и для выбора передаточного отношения, если используется редуктор. В данном проекте принята схема прямого соединения двигателя с ходовым винтом через упругую компенсирующую муфту (без редуктора). Это упрощает конструкцию и исключает люфты, но требует двигателя с достаточным моментом на низких оборотах.

Расчёт числа шагов на миллиметр:

При прямом соединении за один оборот двигателя винт делает один оборот. Число шагов, которое должен выдать контроллер для перемещения на 1 мм:

$$S = \frac{N_{full} \cdot N_{micro}}{p} \quad (1)$$

где:

N_{full} — количество полных шагов на один оборот двигателя (для 1,8° это 200);

N_{micro} — коэффициент микрошага, устанавливаемый на драйвере (примем 8 для баланса плавности и скорости);

p — шаг винта в мм.

$$\text{Для оси Z: } S_z = \frac{200 \cdot 8}{12} = \frac{1600}{12} = 133.333 \text{ шаг/мм.} \quad (2)$$

$$\text{Для оси X: } S_x = \frac{200 \cdot 8}{5} = \frac{1600}{5} = 320 \text{ шаг/мм.} \quad (3)$$

Соответствующее разрешение позиционирования (цена импульса):

Ось Z: $1/133.333 = 0.0075$ мм.

Ось X: $1/320 = 0.003125$ мм.

Полученное разрешение (7,5 мкм для Z и 3,1 мкм для X) более чем достаточно для токарной обработки (обычно допуски 0,01–0,05 мм).

2.2.2 Силовой расчет требуемого крутящего момента

Расчёт момента на валу двигателя проводится для двух режимов:

1. Режим рабочей подачи (резание) — определяется статической составляющей от сил резания и трения.
2. Режим быстрого перемещения (ускорение) — добавляется динамическая составляющая, связанная с разгоном масс.

Общая формула момента на валу двигателя (при прямом соединении):

$$M_{tot} = \frac{(F_{cut} + F_f) \cdot p}{2\pi\eta} + M_{dyn} \quad (4)$$

где:

F_{cut} — сила резания (осевая составляющая, действующая на суппорт);

F_f — сила трения в направляющих;

M_{dyn} — момент, необходимый для преодоления инерции системы.

2.2.2.1 Расчёт статической составляющей

Сила трения в направляющих:

$$F_f = \mu \cdot m \cdot g \quad (5)$$

$$\text{Для оси Z: } F_f^Z = 0.15 \cdot 150 \cdot 9.81 = 220.7 \text{ Н.} \quad (6)$$

$$\text{Для оси X: } F_f^X = 0.15 \cdot 50 \cdot 9.81 = 73.6 \text{ Н.} \quad (7)$$

Сила резания. При точении осевая составляющая силы резания обычно составляет 30–50% от тангенциальной P_z . Однако для гарантии и упрощения расчёта будем считать, что максимальная осевая нагрузка на суппорт (по направлению подачи) может достигать 70% от P_z при продольном точении и 100% при поперечном (подрезка торца). Примем:

$$\text{Для оси Z: } F_{cut}^Z = 0.7 \cdot 2000 = 1400 \text{ Н.} \quad (8)$$

$$\text{Для оси X: } F_{cut}^X = 2000 \text{ Н (наихудший случай — подрезка с большим сечением среза).} \quad (9)$$

Статический момент на винте (при рабочей подаче):

$$M_{stat} = \frac{(F_{cut} + F_f) \cdot p}{2\pi\eta} \quad (10)$$

Для оси Z:

$$M_{stat}^Z = \frac{(1400+220.7) \cdot 0.012}{2\pi \cdot 0.3} = \frac{1620.7 \cdot 0.012}{1.884} \approx 10.33 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (11)$$

Для оси X:

$$M_{stat}^X = \frac{(2000+73.6) \cdot 0.005}{1.884} = \frac{2073.6 \cdot 0.005}{1.884} \approx 5.50 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (12)$$

2.2.2.2 Расчёт динамической составляющей (момент для разгона)

Для разгона суппорта необходимо преодолеть инерцию вращающихся и поступательно движущихся масс. Приведём все массы к валу двигателя.

Момент инерции ротора двигателя J_{rotor} (из каталога). Для двигателей NEMA 34 типовое значение 1000–2000 г·см². Предварительно примем $J_{rotor} = 1500 \text{ г} \cdot \text{см}^2 = 1.5 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Момент инерции муфты J_{coupl} — пренебрегаем ввиду малости.

Приведённый момент инерции поступательно движущейся массы m к валу двигателя:

$$J_{load} = m \cdot \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2 \quad (13)$$

где p в метрах.

Для оси Z:

$$J_{load}^Z = 150 \cdot \left(\frac{0.012}{2\pi}\right)^2 = 150 \cdot \left(\frac{0.012}{6.283}\right)^2 = 150 \cdot (0.00191)^2 = 150 \cdot 3.65 \times 10^{-6} \approx 5.48 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (14)$$

Для оси X:

$$J_{load}^X = 50 \cdot \left(\frac{0.005}{2\pi}\right)^2 = 50 \cdot \left(\frac{0.005}{6.283}\right)^2 = 50 \cdot (0.000796)^2 = 50 \cdot 6.34 \times 10^{-7} \approx 3.17 \times 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (15)$$

Суммарный момент инерции на валу двигателя:

$$J_{total} = J_{rotor} + J_{load} \quad (16)$$

Для оси Z: $J_{total}^Z = 1.5 \times 10^{-4} + 5.48 \times 10^{-4} = 6.98 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. (17)

Для оси X: $J_{total}^X = 1.5 \times 10^{-4} + 3.17 \times 10^{-5} = 1.817 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. (18)

Требуемое угловое ускорение вала двигателя. Линейное ускорение суппорта a определяется желаемым временем разгона t_a и максимальной скоростью V_{max} :

$$a = \frac{V_{max}}{t_a} \quad (19)$$

Для оси Z: $V_{max}^Z = 2 \text{ м/мин} = 0.0333 \text{ м/с}$, (20)

Тогда $a^Z = \frac{0.0333}{0.2} = 0.1665 \text{ м/с}^2$. (21)

Угловое ускорение вала двигателя связано с линейным соотношением:

$$\varepsilon = \frac{a}{r} \cdot 2\pi \text{ (рад/с}^2\text{)} \quad (22)$$

Для оси Z: $\varepsilon^Z = \frac{0.1665}{0.012} \cdot 2\pi = 13.875 \cdot 6.283 \approx 87.2 \text{ рад/с}^2$. (23)

Для оси X: $V_{max}^X = 1 \text{ м/мин} = 0.01667 \text{ м/с}$, (24)

$$a^X = \frac{0.01667}{0.2} = 0.08335 \text{ м/с}^2, \quad (25)$$

$$\varepsilon^X = \frac{0.08335}{0.005} \cdot 2\pi = 16.67 \cdot 6.283 \approx 104.7 \text{ рад/с}^2. \quad (26)$$

Динамический момент:

$$M_{dyn} = J_{total} \cdot \varepsilon \quad (27)$$

Для оси Z: $M_{dyn}^Z = 6.98 \times 10^{-4} \cdot 87.2 \approx 0.0609 \text{ Н} \cdot \text{м}$ (пренебрежимо мал). (28)

Для оси X: $M_{dyn}^X = 1.817 \times 10^{-4} \cdot 104.7 \approx 0.0190 \text{ Н} \cdot \text{м}$ (также мал). (29)

Как видим, динамическая составляющая на порядки меньше статической, что характерно для тяжёлых станков с низкими ускорениями. Поэтому основной вклад даёт статика.

2.2.2.3 Общий требуемый момент

С учётом возможных перегрузок, износа и падения момента на рабочей скорости введём коэффициент запаса $k = 2.5$ для статической составляющей (так как динамика мала, общий момент практически равен статическому).

$$\text{Для оси Z: } M_{req}^Z = 10.33 \times 2.5 \approx 25.8 \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad (30)$$

$$\text{Для оси X: } M_{req}^X = 5.50 \times 2.5 \approx 13.75 \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad (31)$$

Однако нужно учесть, что удерживающий момент двигателя (который указывается в паспорте) реализуется при нулевой скорости. С ростом скорости момент падает. Чтобы гарантировать работоспособность на максимальной рабочей подаче (например, при нарезании резьбы), запас должен быть ещё больше. Поэтому для унификации принимаем решение установить на обе оси двигатели с удерживающим моментом не менее 18–20 Н·м. Это даст запас ~ 2 для оси Z и ~ 3.5 для оси X.

2.2.3 Выбор шаговых двигателей и драйверов

На основе требуемого момента (не менее 18 Н·м) выбираем двигатели типоразмера NEMA 34 (фланец 86×86 мм). Рассмотрим несколько моделей, доступных на рынке, и сравним их характеристики, данные сведём в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 — Сравнение шаговых двигателей NEMA 34

Модель	Удерживающий момент, Н·м	Фазный ток, А	Индуктивность, мГн	Длина корпуса, мм	Производитель
FL86STH118-6008	18,0	6,0	12	118	Changzhou Fuyu
86HS118-6004	12,5	6,0	8,5	118	Leadshine
86HS156-8004	20,0	8,0	12	156	Leadshine
J-5718HB6401	18,5	6,4	14	118	Japan Servo

Для нашего проекта выберем FL86STH118-6008 (рисунок 2.1) как компромисс по цене и моменту. Удерживающий момент 18 Н·м, номинальный ток 6 А, индуктивность 12 мГн.



Рисунок 2.1 – Шаговый двигатель FL86STH118-6008

Проверка по графику момент-скорость. По данным производителя, при напряжении питания 48В и драйвере с микрошагом 1/8, на скорости 300 об/мин (что соответствует линейной скорости для оси Z: $V = 300 \cdot 0.012 = 3.6$ м/мин, что выше наших 2 м/мин) момент составляет около 12 Н·м. Для оси Z при 2 м/мин скорость двигателя ~166 об/мин, момент должен быть около 15–16 Н·м, что превышает требуемые 10.33×2.5 ? Нет, требуемый с запасом 2.5 — это 25.8 Н·м, но это завышенное требование из-за коэффициента 2.5. На самом деле, реальный необходимый момент при рабочей подаче — 10.33 Н·м. С учётом того, что на низких оборотах (до 200 об/мин) двигатель выдаёт момент, близкий к удерживающему (около 18 Н·м), запас по моменту составит $18 / 10.33 \approx 1.74$, что приемлемо. Для оси X при 1 м/мин скорость двигателя 200 об/мин, момент ~17 Н·м, требуемый 5.5 Н·м, запас >3.

Таким образом, выбранный двигатель удовлетворяет условиям.

Выбор драйвера. Драйвер должен обеспечивать ток не менее 6 А и поддерживать напряжение питания до 80 В (48 В — оптимально). Выбираем DM860T, рисунок 2.2 (Leadshine или аналог):

- Входное напряжение: 24–80 В DC.
- Выходной ток: 2.4–7.2 А (устанавливается DIP-переключателями).
- Поддержка микрошага до 1/256.
- Оптоизолированные входы STEP/DIR.



Рисунок 2.2 – Драйвер DM860T

Выбор блока питания. Общая мощность, потребляемая двумя двигателями:

$$P_{total} = 2 \cdot U \cdot I_{phase} \cdot k_{util} \quad (32)$$

Где $k_{util} \approx 0.7$ — коэффициент использования (двигатели не всегда работают на полном токе).

$P_{total} = 2 \cdot 48 \cdot 6 \cdot 0.7 = 403.2$ Вт. С запасом 30% выбираем блок питания на 48 В, 600–700 Вт (12–15 А). Можно взять готовый импульсный блок питания на 48В 20А (960 Вт) — этого достаточно с запасом. Выбираем SDR-960-48, рисунок 2.3.



Рисунок 2.3 – Блок питания SDR-960-48

2.3 Расчет и выбор привода шпинделя

Шаговый двигатель не подходит для шпинделя из-за низкой максимальной скорости и резкого падения момента. Поэтому применяем частотное регулирование существующего асинхронного двигателя.

Исходные данные двигателя шпинделя:

- Тип: 4A132M4У3 (или аналогичный).
- Мощность $P_{nom} = 10$ кВт.
- Номинальное напряжение $U_{nom} = 380$ В (звезда).
- Номинальный ток $I_{nom} = 21$ А.
- Номинальная частота вращения $n_{nom} = 1450$ об/мин.
- Коэффициент мощности $\cos \phi = 0.87$.
- Кратность пускового тока $I_{start}/I_{nom} = 6.5 \div 7$.

Выбор частотного преобразователя (ЧП).

Основные критерии:

1. Мощность ЧП должна быть не ниже мощности двигателя. Стандартный ряд: 11 кВт, 15 кВт. Выбираем 15 кВт (запас 50% для обеспечения пускового момента и перегрузок).

2. Номинальный выходной ток ЧП должен быть не менее номинального тока двигателя. Для ЧП мощностью 15 кВт (380 В) выходной ток обычно 30–32 А, что больше 21 А.

3. Перегрузочная способность. ЧП должен выдерживать 150% номинального тока в течение 60 с. $30 \text{ А} \times 1.5 = 45 \text{ А}$, что достаточно для пускового тока $21 \times 7 = 147 \text{ А}$? Нет, 147 А — это пусковой ток прямого пуска. При частотном пуске ток ограничивается настройками ЧП, обычно до 150% номинала, т.е. до 45 А. Это допустимо, так как двигатель при пуске под нагрузкой разгоняется плавно, и пиковый ток не превышает уставки.

4. Напряжение питания ЧП: трёхфазное 380 В.

5. Управление: необходимо наличие аналогового входа 0–10 В для задания скорости, дискретных входов для пуска/останова/реверса, а также релейного выхода для сигнализации. Желательно наличие тормозного прерывателя для подключения тормозного резистора (для быстрого останова шпинделя).

Выбор модели. Остановимся на преобразователе Inovance GD200A-015G-2 (рисунок 2.4):

- Мощность: 15 кВт.
- Выходной ток: 32 А.
- Диапазон управления скоростью: 0–400 Гц.
- Функция автоподстройки параметров двигателя.
- Встроенный ПИД-регулятор.
- Аналоговые входы: 0–10 В, 0–20 мА.
- Цифровые входы: 6 программируемых.
- Релейные выходы: 2.



Рисунок 2.4 - Частотный преобразователь INVT GD200A 15 кВт 380В

Расчёт тормозного резистора. Для обеспечения быстрого торможения шпинделя (особенно при смене инструмента) необходим тормозной резистор. Мощность резистора обычно составляет 10–30% от мощности ЧП. Для 15 кВт выбираем резистор мощностью 2–3 кВт, сопротивлением 30–50 Ом (согласно рекомендации производителя ЧП).

2.4 Выбор автоматической револьверной головки

Для реализации автоматической смены инструмента в цикле ЧПУ станок оснащается револьверной головкой. Основные требования: возможность управления от контроллера, высокая точность фиксации, совместимость с суппортом станка 1К62 по высоте центров и посадочным размерам.

На основании анализа рынка выбрана револьверная головка XWD100-6 (производство Китай / Тайвань, рисунок 2.5). Её основные характеристики:

- Количество позиций: 6;
- Привод: серводвигатель (интегрированный или внешний) – обеспечивает быстрое и точное позиционирование;
- Время смены инструмента: ~3 секунды;
- Державки резцов: 20×20 мм (стандарт);
- Диаметр отверстия для расточного инструмента: 32 мм;

- Высота центров: 100 мм (полностью соответствует станку 1K62);
- Наличие датчиков фиксации положения (обычно индуктивные);
- Управление: дискретные сигналы «вперед/назад» + сигнал «позиция готова» от контроллера ЧПУ.



Рисунок 2.5 - Револьверная головка XWD100-6

Головка монтируется на верхние салазки суппорта вместо штатного резцедержателя. Для этого изготавливается переходная плита. Подключение к контроллеру осуществляется через релейный модуль или непосредственно с использованием выходов контроллера (с гальванической развязкой).

Сервопривод головки требует настройки параметров ускорения и торможения в драйвере, что выполняется однократно при пусконаладке. В отличие от шагового двигателя, сервопривод не теряет шаг, что гарантирует точную фиксацию каждой позиции.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗИРОВАННЫМ СТАНКОМ

3.1 Разработка структурной схемы системы ЧПУ

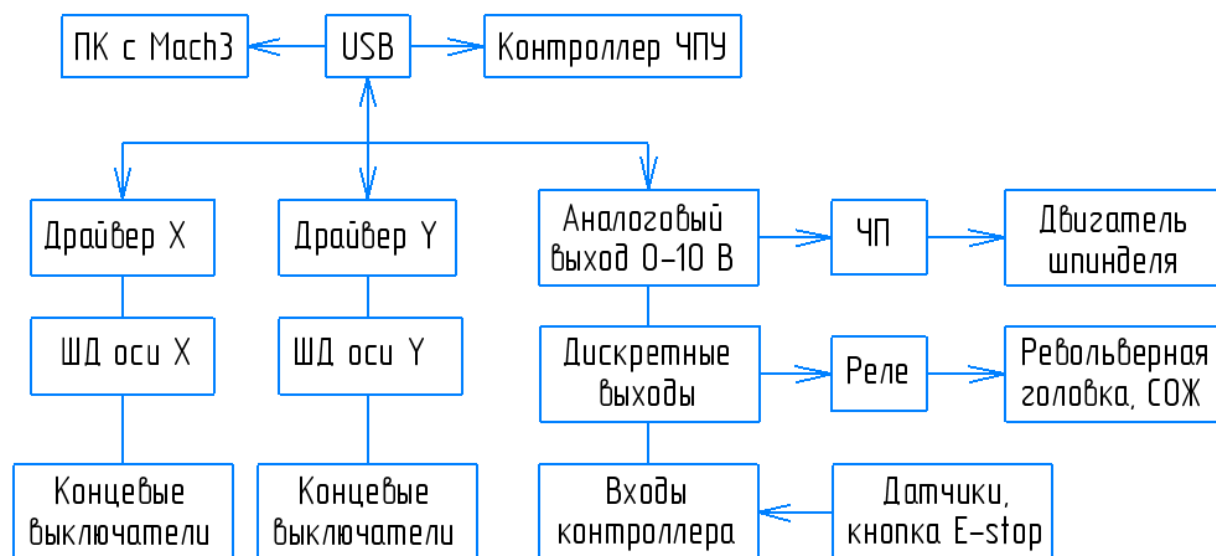


Рисунок 3.1 – Структурная схема взаимосвязей

Структурная схема на рисунке 3.1 отражает взаимодействие всех компонентов системы. Она включает следующие уровни:

1. Уровень программирования и визуализации: Персональный компьютер (ПК) с установленным ПО Mach3. Mach3 выполняет функции интерпретатора G-кода, формирует сигналы управления и отображает состояние станка.

2. Уровень контроллера: Специализированный контроллер ЧПУ (CNC USB Controller или аналог), который через USB-порт получает от Mach3 пакеты данных и преобразует их в импульсные сигналы STEP/DIR для драйверов шаговых двигателей, а также в аналоговый и дискретные сигналы для управления шпинделем и вспомогательным оборудованием.

3. Исполнительный уровень:

- Драйверы шаговых двигателей (DM860T) преобразуют сигналы STEP/DIR в силовые импульсы, коммутирующие фазы ШД.

- Частотный преобразователь (Inovance) получает аналоговый сигнал 0–10В (задание скорости) и дискретные сигналы (Пуск/Стоп) и управляет двигателем шпинделя.

- Реле управления револьверной головкой и насосом СОЖ.

4. Уровень обратной связи и безопасности:

- Концевые выключатели осей (нормально замкнутые) подключены к входам контроллера и в цепь аварийной остановки.

- Датчик положения револьверной головки.

- Кнопка аварийного останова (E-stop) разрывает цепь питания драйверов и подаёт сигнал на контроллер.

3.2 Выбор и обоснование компонентов системы управления

3.2.1 Выбор контроллера ЧПУ

Контроллер является связующим звеном между программным обеспечением верхнего уровня и силовой частью. К нему предъявляются следующие требования:

- Поддержка не менее 3 осей (X, Z, и возможно, ось для револьверной головки).

- Наличие достаточного количества дискретных входов (не менее 8) для подключения концевых выключателей, кнопок, датчика инструмента.

- Наличие дискретных выходов (не менее 6) для управления реле.

- Наличие аналогового выхода 0–10В для управления ЧП.

- Высокая помехозащищённость, возможность работы в условиях производственной среды.

Рассмотрим два варианта:

1. Контроллер на базе микроконтроллера Arduino + прошивка GRBL. Это бюджетное решение, но оно имеет ограничения: поддержка только 3 осей, ограниченное количество входов/выходов, необходимость самостоятельной сборки и настройки, отсутствие аналогового выхода. Не рекомендуется для серьёзного станка.

2. Специализированный промышленный контроллер для Mach3. Пример: CNC USB Controller (модель UC300 или аналог), САУОП-M2 (русский аналог), Ethernet SmoothStepper.

- Достоинства: высокая скорость обработки (до 4 МГц по STEP), гальваническая развязка входов/выходов, встроенный генератор аналогового сигнала, большое количество портов.

- Недостатки: более высокая стоимость по сравнению с Arduino, но приемлемая для проекта (около 10–15 тыс. руб.).

Выбираем CNC USB Controller (например, модель на базе чипа 3040 или 300E, рисунок 3.2). Его характеристики:

- Подключение к ПК по USB 2.0.
- 4 оси с выходом STEP/DIR до 400 кГц.
- 16 оптоизолированных входов (5–24В).
- 8 оптоизолированных выходов (5–24В, до 100 мА).
- 2 аналоговых выхода 0–10В (12 бит).
- Возможность подключения энкодера шпинделя для синхронизации при нарезании резьбы.
- Работа с Mach3 без дополнительных драйверов (plug-in).

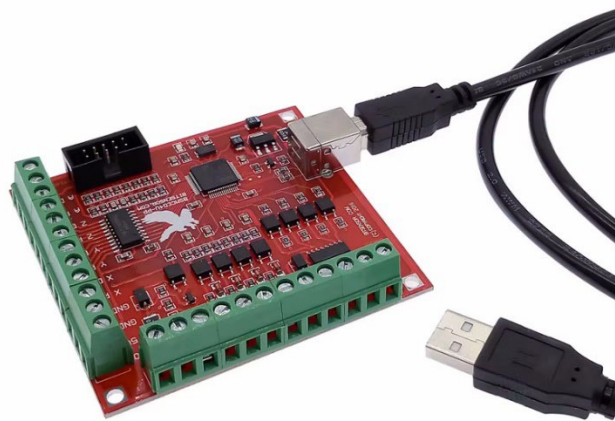


Рисунок 3.2 – CNC USB Controller

3.2.2 Выбор программного обеспечения

Mach3 — наиболее популярная программа для управления станками с ЧПУ на платформе Windows [9]. Поддерживает до 6 осей, имеет гибкую

настройку, огромное сообщество пользователей, что облегчает поиск решений проблем. На рисунке 3.3 представлено главное окно программы

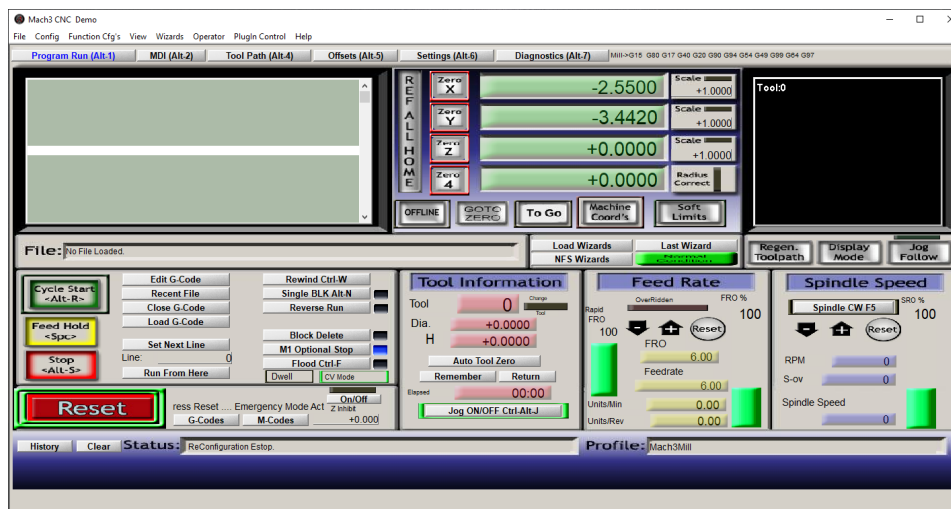


Рисунок 3.3 – Главное окно программы Mach3

Настройка Mach3 для нашего станка:

- Создание нового профиля.
- Настройка портов и пинов: назначение выводов контроллера для сигналов STEP, DIR, Enable, а также для входов (концевики, E-stop) и выходов (управление реле).
- Настройка параметров двигателя (Motor Tuning):
 - Steps per Unit: вводим рассчитанные значения (133.333 для Z, 320 для X).
 - Velocity (скорость быстрых перемещений): например, 2000 мм/мин для Z, 1000 мм/мин для X.
 - Acceleration: подбирается экспериментально, но можно задать 100–200 мм/с².
- Настройка входов/выходов:
 - Входы конечных выключателей назначаются на сигналы Limit (Home, Limit-).
 - Выходы управления шпинделем: назначить на соответствующие пины, настроить активацию M3 (пуск), M4 (реверс), M5 (стоп).

Выход аналогового сигнала 0–10В настраивается через функцию PWM (или специальный плагин) и привязывается к командам S (скорость шпинделя).

Дополнительное ПО:

— САМ-система: Fusion 360 (бесплатна для студентов и любителей) позволяет создавать 3D-модели и генерировать G-код для токарной обработки.

— Программа для настройки ЧП: Inovance EasyPro или ПО производителя для параметрирования частотного преобразователя.

3.3 Разработка принципиальной электрической схемы

Принципиальная электрическая схема должна отражать все электрические соединения между компонентами. Основные цепи:

Силовая часть:

- Ввод трёхфазного напряжения 380В через автоматический выключатель QF1.
- Подключение к частотному преобразователю (L1, L2, L3).
- Выход ЧП (U, V, W) — к двигателю шпинделя.
- Подключение тормозного резистора (если используется) к клеммам BR и B-.
- Цепь 220В для блока питания драйверов (через трансформатор или непосредственно) и для питания вентиляторов, освещения.

Цепи управления (низкое напряжение):

- Блок питания 48В (для драйверов) и блок питания 24В (для реле, датчиков) — могут быть отдельными.
- Контроллер ЧПУ получает питание от USB (5В) или от внешнего источника 5В.
- Сигналы STEP+, STEP-, DIR+, DIR- от контроллера к драйверам DM860T (дифференциальные или открытый коллектор — проверяется совместимость). Обычно используют однополярные сигналы с общим GND, подтяжкой к +5В.

- Входы контроллера: концевики (NO или NC), подключаются через оптопары. Для повышения помехоустойчивости применяют экранированные провода.

- Выходы контроллера (открытый коллектор) управляют катушками реле (например, реле Finder с напряжением 24В). Диоды параллельно катушкам для гашения обратного ЭДС.

- Для управления сервоприводом револьверной головки XWD100-6 используются два дискретных выхода контроллера (направление вращения и пуск) и один вход для сигнала фиксации позиции

- Аналоговый выход 0–10В подключается к входу AI1 ЧП (общий GND аналоговый).

Цепи безопасности:

- Кнопка аварийного останова (E-stop) разрывает цепь питания 24В реле, которые подают питание на драйверы (Enable) и на катушки пускателей. Также сигнал E-stop подаётся на вход контроллера для программной остановки.

3.4 Настройка программного обеспечения и параметров системы

После монтажа и проверки соединений производится настройка.

3.4.1 Настройка драйверов DM860T [8]:

- DIP-переключателями устанавливается:

Ток двигателя: согласно паспорту 6 А (обычно комбинация SW1-SW4).
Для DM860T есть таблица.

Микрошаг: выбираем 1/8 (например, SW5-SW8).

Коэффициент ослабления тока в покое (Auto current reduction) — обычно включено.

3.4.2 Настройка Mach3 [9]:

- Запуск Mach3, загрузка профиля.

- Config → Ports and Pins:

Вкладка Motor Outputs: назначить для каждой оси номера портов и пинов для STEP и DIR. Для контроллера CNC USB обычно используются пины, соответствующие определённым номерам в плагине.

Вкладка Input Signals: назначить пины для концевых выключателей (Limit -, Home), кнопки E-stop. Указать активный уровень (Low или High).

Вкладка Output Signals: назначить пины для управления шпинделем (например, Output #1 — для M3, Output #2 — для M4), для револьверной головки и т.д.

- Config → Motor Tuning: ввести Steps per, Velocity, Acceleration для каждой оси. Нажать «Save Axis Settings».

- Config → Spindle Setup: настроить тип управления (PWM или аналоговый сигнал), минимальную и максимальную скорость, соответствующую 0–10В.

- Настроить Hotkeys (горячие клавиши) для ручного управления.

3.4.3 Настройка частотного преобразователя Inovance [10]:

- Подать питание на ЧП.

- Войти в режим параметров (параметры группы F).

- Установить базовые параметры двигателя: F1-01 (мощность), F1-02 (напряжение), F1-03 (ток), F1-04 (частота), F1-05 (обороты). Выполнить автоподстройку (Auto-tuning).

- Настроить источник задания частоты: F0-03 = 2 (аналоговый вход AI1).

- Настроить команды управления: F0-02 = 2 (клеммы управления). Задать функции дискретных входов (например, DI1 = пуск вперед, DI2 = пуск назад, DI3 = внешний сброс ошибки).

- Настроить время разгона/торможения: F0-17, F0-18 (обычно 5–10 с для шпинделя, но можно меньше для быстрого торможения с резистором).

- Установить параметры защиты: токовые пределы, защита от перегрева.

3.5 Алгоритмы управления дополнительными функциями

3.5.1 Алгоритм смены инструмента

Смена инструмента в токарном станке с револьверной головкой включает следующие шаги (реализуется в макросе M6 в Mach3):

1. Получение команды M6 Tn (n – номер инструмента от 1 до 6).
2. Проверка, остановлен ли шпиндель и выключена ли подача СОЖ.
3. Отвод суппорта в безопасную позицию смены инструмента (обычно $X = \max$, $Z = -50$ мм от нуля).
4. Подача сигнала на сервопривод револьверной головки XWD100-6 (выход контроллера активирует реле «пуск вращения»).
5. Ожидание поступления сигнала от датчика фиксации требуемой позиции (вход контроллера). Время ожидания ограничено 5 секундами – при превышении возникает авария «нефиксация позиции».
6. Отключение привода головки и кратковременная задержка (0,2 с) для заклинивания механизма.
7. Возврат суппорта в рабочую зону с учётом коррекции длины инструмента (значения хранятся в таблице инструментов Mach3).
8. Продолжение выполнения программы.

Примечание: благодаря сервоприводу XWD100-6 отпадает необходимость в реверсировании для поиска позиции – достаточно однократного вращения в одну сторону до срабатывания нужного датчика.

3.5.2 Алгоритм обработки аварийных ситуаций

При срабатывании любого концевого выключателя или нажатии кнопки E-stop:

1. Контроллер немедленно прекращает генерацию импульсов STEP (снимает сигналы с выходов).
2. Одновременно через реле отключается питание драйверов (сигнал Enable) и снимается сигнал «Пуск» с ЧП (шпиндель останавливается по выбегу или активно тормозит, если настроено).
3. Mach3 переходит в состояние аварии (Emergency Stop), программа останавливается.
4. На экране выводится сообщение о сработавшем датчике.

5. Для возобновления работы необходимо устранить причину аварии, нажать кнопку сброса (Reset) в Mach3 и вручную вернуть суппорт в допустимую зону (при необходимости).

Важно предусмотреть, что концевики должны быть нормально замкнутыми (NC), чтобы обрыв провода также вызывал аварийную остановку.

ГЛАВА 4 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТА МОДЕРНИЗАЦИИ

4.1 Расчет капитальных затрат на модернизацию

В таблице 1 представлена смета затрат на приобретение оборудования и материалов, необходимых для модернизации. Цены на комплектующие определены на основе рыночных предложений [12].

Таблица 1 — Смета капитальных затрат

№	Наименование	Кол-во	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
1	Шаговый двигатель NEMA 34 (18 Н·м)	2	15 000	30 000
2	Драйвер шагового двигателя DM860T	2	8 000	16 000
3	Блок питания 48V 20A	1	10 000	10 000
4	Контроллер ЧПУ (CNC USB Controller)	1	15 000	15 000
5	Частотный преобразователь 15 кВт	1	40 000	40 000
6	Револьверная головка XWD100-6 (6 поз., сервопривод)	1	95 000	95 000
7	Механические компоненты (муфты, крепеж)	компл.	20 000	20 000
8	Кабельно-проводниковая продукция	компл.	5 000	5 000
9	Концевые выключатели и кнопки	компл.	4 000	4 000
	Итого по оборудованию			235 000
10	Прочие расходы (монтаж, пусконаладка)		30 000	30 000
	Общая сметная стоимость			265 000

Примечание: цены приведены ориентировочные, на момент составления проекта.

4.2 Сравнительный анализ альтернативных вариантов

1. Покупка нового токарного станка с ЧПУ – от 1 200 000 руб [11].
Модернизация дешевле в 4,5–5 раз.
2. Покупка готового комплекта для модернизации – от 250 000 до 400 000 руб [12]. Самостоятельный подбор экономит до 100 000 руб.

4.3 Расчет экономической эффективности и срока окупаемости

4.3.1 Расчет дополнительной прибыли

До модернизации станок приносил 20 000 руб./мес. чистой прибыли. После модернизации за счет сокращения вспомогательного времени и автоматической смены инструмента производительность возрастает в 2–3 раза. Принимаем увеличение чистой прибыли на 40 000 руб./мес (до 60 000 руб./мес).

4.3.2 Расчет эксплуатационных затрат

Затраты на электроэнергию и обслуживание возрастают незначительно. Амортизация: $265\,000 / 5 \text{ лет} = 53\,000 \text{ руб./год} \approx 4\,400 \text{ руб./мес.}$

4.3.3 Расчет срока окупаемости

$$T_{\text{ок}} = \frac{\text{Капитальные затраты}}{\text{Дополнительная прибыль в месяц}} = \frac{265000}{40000} \approx 6,6 \text{ месяца.} \quad (33)$$

С учетом пусконаладочных работ – не более 7–8 месяцев, что является отличным показателем.

4.4 Качественные преимущества проекта

- Полная автоматизация смены инструмента (6 позиций).
- Возможность обработки сложных деталей без участия оператора.
- Продление ресурса станка и повышение его рыночной стоимости.

4.5 Оценка рисков

- Технический риск отказа сервопривода головки – минимизируется выбором качественного оборудования и настройкой защит.

- Риск несовместимости посадочных размеров – до покупки необходимо уточнить чертежи суппорта и изготовить переходную плиту.

4.6 Выводы по экономическому обоснованию

Модернизация станка 1K62 с установкой револьверной головки XWD100-6 требует капитальных вложений около 265 000 рублей, что в 4–5 раз ниже стоимости нового оборудования. Срок окупаемости менее 7 месяцев подтверждает высокую эффективность проекта.

ГЛАВА 5 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОЕКТА

5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

При работе на модернизированном станке возможны следующие факторы:

- Физические: движущиеся части станка (суппорт, шпиндель, револьверная головка), отлетающая стружка и разрушающийся инструмент, повышенный уровень шума, опасность поражения электрическим током (цепи 380В и 48В).
- Организационные: работа при неисправных блокировках, отсутствие защитных экранов.

5.2 Требования безопасности перед началом работы.

- Проверить наличие и исправность защитных кожухов и экранов.
- Убедиться в целостности заземления станка.
- Проверить исправность кнопки аварийного останова.
- Убрать с рабочей зоны посторонние предметы.

5.3 Требования безопасности во время работы.

- Запрещается открывать защитные экраны при вращающемся шпинделе.
- Запрещается производить наладку и измерения при работающем станке.
- Использовать защитные очки.
- При появлении постороннего шума или вибрации немедленно остановить станок.

5.4 Требования безопасности в аварийных ситуациях.

При возникновении аварийной ситуации (заклинивание инструмента, запах гари, попытка выхода суппорта за пределы) необходимо немедленно нажать кнопку «Аварийный стоп» и обесточить станок.

5.5 Конструктивные мероприятия по обеспечению безопасности.

Проектом предусмотрены следующие меры:

- Установка концевых выключателей на крайние положения осей X и Z;
- Установка кнопки аварийного останова красного цвета с фиксацией;
- Подключение защитного заземления ко всем металлическим частям;
- Размещение электронных компонентов в герметичном электрошкафу;
- Выбор проводов с двойной изоляцией.

5.6 Экологичность проекта

5.6.1 Снижение негативного воздействия на окружающую среду

Модернизация станка не приводит к увеличению вредных выбросов. Напротив, использование современного ЧПУ позволяет оптимизировать режимы резания, снижая энергопотребление по сравнению с работой на максимальных оборотах коробки скоростей.

5.6.2 Оценка жизненного цикла оборудования

Проект продлевает жизненный цикл металлообрабатывающего оборудования, предотвращая его утилизацию. Это является ресурсосберегающим мероприятием и соответствует принципам "зеленой" экономики.

5.7 Мероприятия по снижению профессиональных рисков

Для оператора станка с ЧПУ основным риском является монотонная работа. Рекомендуется введение регламентированных перерывов. Риск травматизма снижается за счет автоматизации процесса и исключения ручных операций подачи.

5.8 Заключение по безопасности и экологичности

Разработанный проект модернизации учитывает требования безопасности, предъявляемые к металлообрабатывающему оборудованию. Заложенные технические решения (концевики, аварийный стоп, заземление)

обеспечивают безопасную эксплуатацию станка. С экологической точки зрения проект является нейтральным и способствует ресурсосбережению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения дипломного проекта разработан технический проект модернизации токарно-винторезного станка 1K62 в станок с ЧПУ.

В ходе работы решены следующие задачи:

1. Проведен анализ теоретических основ шаговых приводов, обоснована их применимость для модернизации.
2. Выполнен анализ станка 1K62, получены исходные данные для расчета.
3. Произведен кинематический и силовой расчет приводов подачи. Для оси Z требуемый момент составил 10.96 Н·м, для оси X — 4.17 Н·м. С учетом запаса выбраны унифицированные шаговые двигатели NEMA 34 с моментом 18 Н·м и драйверы DM860T.
4. Для привода главного движения выбран частотный преобразователь мощностью 15 кВт, позволяющий программно управлять скоростью вращения шпинделя.
5. Выбрана автоматическая револьверная головка XWD100-6 с сервоприводом, обеспечивающая быструю смену шести инструментов и полностью интегрируемая в систему управления на базе Mach3.
6. Разработана структурная и принципиальная электрическая схема системы управления на базе контроллера CNC USB Controller и программного обеспечения Mach3.
7. Экономическое обоснование показало, что затраты на модернизацию составят около 265 000 рублей, что в несколько раз ниже стоимости нового станка. Срок окупаемости проекта при коммерческом использовании не превысит 6 месяцев.
8. В разделе безопасности проанализированы вредные факторы и предложены меры для обеспечения безопасной работы оператора.

Таким образом, проект модернизации является технически реализуемым, экономически целесообразным и безопасным. Полученное в результате оборудование позволит расширить технологические возможности и повысить производительность труда.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 12.2.009-99. Система стандартов безопасности труда. Станки металлообрабатывающие. Общие требования безопасности. — М.: Стандартиформ, 2000. — 18 с.
2. ГОСТ 12.1.030-81. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление. — М.: Издательство стандартов, 1981.
3. Свешников В.К., Усов А.А. Станочные гидроприводы: Справочник. — 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 2019. — 456 с.
4. Москалев И.Е. Электрооборудование станков с ЧПУ. — М.: Академия, 2017. — 208 с.
5. Бушуев В.В., Кузнецов А.П. Металлорежущие станки: учебник для вузов. В 2 т. Т.1. — М.: Машиностроение, 2020. — 608 с.
6. Кенно Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 2019. — 192 с.
7. Руководство по эксплуатации станка токарно-винторезного 1К62. — М.: Станкостроительный завод «Красный пролетарий», 1985. — 120 с.
8. Технический паспорт на шаговый двигатель FL86STH118-6008. — Changzhou Fuyu Electromechanical Co., Ltd, 2023.
9. Руководство пользователя программного обеспечения Mach3. — ArtSoft Inc., 2020.
10. Инструкция по эксплуатации частотного преобразователя серии GD200A. — Shenzhen Inovance Technology Co., Ltd, 2022.
11. Петров И.В. Модернизация токарных станков с установкой ЧПУ // Журнал «САПР и графика». — 2022. — №5. — С. 34-38.
12. Форум сообщества ЧПУ-энтузиастов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cnc-club.ru>, свободный (дата обращения: 15.05.2026).