

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

(наименование кафедры)

15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение

машиностроительных производств»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Технология машиностроения

(направленность (профиль)/ специализация)

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему **Выбор шпинделя для трехкоординатного фрезерного станка с ЧПУ центра «Формула Станок»**

Студент	<u>А.Д. Щербакова</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Руководитель	<u>А.А. Козлов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	<u>Н.В. Зубкова</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
	<u>П.А. Корчагин</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
	<u>А.Г. Егоров</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
	<u>О.Н. Брега</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент Н.Ю. Логинов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Тольятти 2019

## АННОТАЦИЯ

Щербакова Анастасия Дмитриевна. Выбор шпинделя для трехкоординатного фрезерного станка с ЧПУ центра «Формула Станок». Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства». Тольятти.ТГУ,2019.

Бакалаврская работа посвящена вопросу выбора подходящего шпинделя для стабильной работы на фрезерном станке с числовым программным управлением на основе техничекй и экономических характеристик.

В первом разделе работы рассмотрено определение и служебное назначение шпинделя, приведены требования на него, перечислены технические требования на станок и проанализированы исходные данные.

Во втором разделе описаны различные виды приводов и виды охлаждающей системы шпинделей, приведены в таблицы модели шпинделей.

В третьем разделе проведен сравнительный анализ приводов, охлаждающей системы и моделей шпинделей. Приведены результаты оценки шпинделей. Сделан обоснованный выбор шпинделя для трехкоординатного фрезерного станка с числовым программным управлением.

Произведена оценка безопасности и экологичности технического объекта и рассчитана экономическая эффективность работы.

Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки в размере 49 страниц, в том числе 11 рисунков, содержит 22 таблицы и графическую часть, содержащую 7 листов А1.

## **ABSTRACT**

The topic of the given graduation work is spindle Selection for three-axis CNC milling machine center "Formula Machine".

This graduation work consists of an explanatory note on of 49 pages, including 11 figures, 22 tables and the graphic part containing 7 A1 sheets.

The graduation work is devoted to the question of choosing a suitable spindle for stable operation on a computer numerical control milling machine based on technical and economic characteristics.

In the first section of the work, the definition and function of the spindle were studied and the requirements for it were listed, the technical requirements for the machine were listed and the initial data were analyzed.

The second section describes the different types of drives and types of cooling system of spindles and they are set out in the table model spindles.

The third section provides a comparative analysis of drives, cooling system and spindle models. The results of the spindles estimation are produced. A reasonable choice of spindle for three-axis computer numerical control milling machine is made.

The assessment of safety and environmental friendliness of technical object was made and economic performance was calculated.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Анализ исходных данных.....	6
1.1 Служебное назначение детали.....	6
1.2 Требование, предъявляемые к шпинделям.....	6
1.3 Технические характеристики станка.....	8
2 Обзор существующих видов шпинделей.....	10
2.1 Шпиндели с внешним приводом.....	10
2.2 Шпиндели со встроенным мотором.....	13
3 Сравнительный анализ шпинделей.....	21
3.1 Сравнительный анализ шпинделей.....	24
3.2 Сравнительный анализ охлаждающей системы.....	27
3.3 Сравнительный анализ моделей воздушных шпинделей.....	30
4 Безопасность и экологичность технического объекта.....	32
5 Экономическая эффективность работы.....	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	46
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	47

## **ВВЕДЕНИЕ**

Фрезерные станки с числовым программным управлением получили весьма широкое распространение за счет своего расширенного круга работ в обработке разнообразных деталей различными инструментами.

Одной из важных составляющих фрезеровочного оборудования является шпиндель. Но с распространением фрезеровочного оборудования, на современном рынке стало доступно большое количество различных моделей шпинделей. Данное устройство характеризуется довольно многими особенностями.

Проблема в выборе подходящего шпинделя для фрезерного станка с ЧПУ традиционно решается сравнением критериев, которыми обладает та или иная модель. Некоторые производители фрезерных станков указывают на то, какой шпиндель лучше выбрать. Стоит следовать рекомендациям, так как указанный механизм подходит в большей степени. Выбору шпинделя уделяется немало внимания, ведь некачественная и ненадежная конструкция прослужит в течение короткого срока, а неправильность установки и допущенные ошибки могут стать причиной для появления различных дефектов.

Цель данной работы– рационально подобрать подходящий шпиндель для работы на фрезерном станке с числовым программным управлением с учетом технических требований на него.

# **1 Анализ исходных данных**

## **1.1 Служебное назначение детали**

«Шпиндельный узел станка является конечным звеном привода главного движения и предназначен для крепления инструмента или приспособления с заготовкой. Качество шпиндельного узла оказывает самое существенное влияние на точность, надежность и производительность всего станка». [1, с.6]

Главной особенностью этого механизма можно назвать то, что он обеспечивает надежную фиксацию инструмента и деталей даже при высокой осевой скорости и вращении. Данное устройство используется при создании самых различных оборудований и инструментов. [2]

Данный шпиндельный узел будет обрабатывать дерево, пластик, мягкие металлы и подобные материалы. Работать в условиях хорошо проветриваемого помещения, где поддерживается постоянная температура окружающего воздуха.

## **1.2 Требования, предъявляемые к шпинделям**

### **1.2.1 Точность вращения**

Точность вращения оценивается величиной радиального или торцевого биения его базовых поверхностей. Величина биения зависит от класса точности станка. Устанавливается соответствующими стандартами в зависимости от назначения станка. Зависит от точности изготовления и точности применяемых опор.

«Радиальное биение наружной центрирующей поверхности шпинделя принимается допуск для станков класса точности Н–10 мкм, для станков класса точности П–6 мкм.

Торцевое биение опорного торца шпинделя принимается допуск для станков класса точности Н–18 мкм, для станков класса точности П–10 мкм.»[3, с.5]. Радиальное биение оси конического отверстия шпинделя представлено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Радиальное биение оси конического отверстия шпинделя

Ширина стола, мм	Сечение измерения	Длина измерения $l$ , мм	Допуск, мкм, для станков класса точности	
			Н	П
До 250	А	-	10	6
	В	150	12	8
Св. 250	А	-	10	6
	В	300	20	12

### 1.2.2 Жесткость

Способность сохранить первоначальное положение шпинделя под воздействием приложенных сил на него сил, называют жесткостью. Высокопроизводительное фрезерование сопровождается значительными силами резания, поэтому следует уделять внимание жесткости технологической системы. [4] Требуемая жесткость шпинделя устанавливается в соответствии с балансом жесткости станка. Регламентируются соответствующими стандартами. Влияние на жесткость шпинделя оказывает его диаметр. Так же межопорные расстояния оказывают небольшое влияние на деформацию шпинделя. Распространенным видом деформации шпинделя является изгиб. Результат расчета на жесткость выражается величиной прогиба конца шпинделя, которая должна быть на радиальное биение шпинделя.

### 1.2.3 Виброустойчивость

Шпиндель должен быть способным не воспринимать внешние колебания. Зависит это свойство от выбранного материала. Виброустойчивость определяется следующими свойствами- частотой своих колебаний и амплитудой колебаний переднего конца шпинделя. На 40-50% параметрами шпиндельного узла определяется виброустойчивостью станка. Частоты собственных колебаний шпинделей измеряются в широких пределах

от 1000 до 600 Гц, что приводит автоколебания к возбуждению при резании. Поэтому для того чтобы обеспечить устойчивое резание нужно снижать режимы резания и ее производительность. [5,6]

#### 1.2.4 Износостойкость

Шпиндели должны обладать не только высокой жесткостью и прочностью, но и достаточной износостойкостью. Это способность шпинделя сохранять длительное время первоначальные геометрические параметры. Зависит так же от выбранного материала шпинделя. Изготавливают износостойкие шпиндели из стали 38МЮА с последующим азотированием.

### 1.3 Технические характеристики станка

Характеристики фрезерного станка с ЧПУ, данные указаны в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Технические характеристики станка

Характеристика	Описание
Тип	Консольный
Класс точности	Н
Категория	Настольный
Назначение	Фрезерование
Обрабатываемый материал	Дерево, пластик, алюминий и др.
Мощность	450 Вт
Максимальная длина заготовки	470 мм
Максимальная ширина заготовки	285 мм
Максимальная высота заготовки	64 мм
Ход по X	471 мм
Ход по Y	287 мм
Ход по Z	127 мм

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить некоторые задачи:

- провести анализ исходных данных;
- исследовать виды и возможности различных моделей шпинделей;
- провести сравнительный анализ шпинделей;
- обосновать выбор шпинделя для фрезерного станка с ЧПУ на основе экономических и технических характеристик.

## **2 Обзор существующих видов шпинделей**

На сегодняшний день на современном рынке мы можем наблюдать большое многообразие моделей шпинделей, различающихся по типу, виду, по назначению, по количеству оборотов в минуту, цене и т.д. Существует два типа приводов – это шпиндели с внешним приводом и шпиндели со встроенным мотором. Рассмотрим их характеристики, преимущества, недостатки и основные бренды и модели.

### **2.1 Шпиндели с внешним приводом**

Конструктивной особенностью этих шпинделей является то, что мощность и вращение передаются от внешнего мотора, который в свою очередь устанавливается около шпинделя. Эти шпиндели не развивают более 12000 об/мин. [7] Говорит это о том, что они не предназначены для высокоскоростного фрезерования, обработки древесины, гравировки и для любых отделочных работ, ведь для этого требуется высокая частота вращения.

В качестве привода используется асинхронный двигатель переменного тока, что позволяет регулировать скорость вращения инструмента, а элементом крутящего момента служить ременная передача.

Шпиндели с ременной передачей используются для обработки инструментом большего диаметра и при обработке черных и цветных металлов, когда от шпинделя требуется высокий момент на малых оборотах, большая жесткость и износостойкость. Обычный шпиндель с ременной передачей имеет в себе установленный в корпус шпиндельный вал на подшипниковых опорах, снабженный системами зажима и разжима инструмента. Во многих моделях данных шпинделей есть возможность автоматической смены режущих инструментов(АТС). [8] На рисунке 1 изображена модель ременного шпинделя с автоматической сменой режущего инструмента.

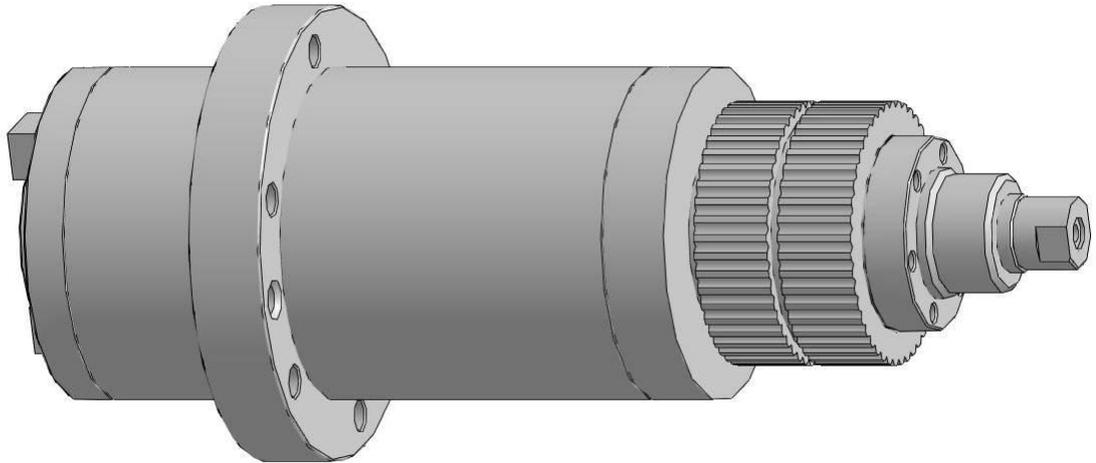


Рисунок 1 – Шпиндель ременный

Преимущества шпинделя с ременной передачей:

- высокая жесткость;
- высокая мощность;
- высокая мощность и момент: так как мотор находится вне шпинделя, поэтому можно использовать мотор большого диаметра, что приведет к повышению момента и мощности;
- широкий диапазон технических данных: момент, мощность и скорость шпинделя зависят от характеристик мотора, поэтому конечную спецификацию шпинделя можно изменить выбором другого мотора или передаточного отношения.

Недостатки шпинделей с ременной передачей, связанные с высокоскоростной обработкой:

- ограничение максимальной скорости: механические соединения, ремень и система шкивов имеют ограничение по скорости, вследствие чего ограничивается скорость и шпинделя с ременной передачей. Когда используется клиноременная передача при высокой скорости вращения шкивов, приводит это к тому, что ремни растягиваются, тем самым ограничивая передачу вращающего момента. Чтобы избавиться от этой

проблемы выбирают клиновидные ремни, но при их применении на высоких скоростях возникает неприемлемый уровень вибраций;

– при натяжении ремня возникает большая нагрузка на подшипники: как уже известно, передача момента передается с помощью ремня и системы шкивов, и на задние подшипники шпинделя посредством натяжения ремня создается постоянная радиальная нагрузка. Ременная передача исчерпывает радиальную нагрузочную способность подшипников с увеличением мощности и скорости шпинделя, а также увеличивается радиальная нагрузка на подшипники;

– малая долговечность ремня в быстроходных передачах.

В таблице 2.1 приведены модели шпинделя с ременной передачей, рассмотрим их.

Таблица 2.1 – Классификация моделей ременных шпинделей

Модель	Мощность привода	Скорость вращения	АТС	Цена	Дополнительно
1	2	3	4	5	6
Шпиндель ременной DB2.5	2,5кВт	2500 об/мин	Нет	16270 р.	Фрезерный шпиндельный узлы с ременным приводом и конусом ВТ и серии DB. Используются для построения фрезерных станков или конвейерной обработки деталей на производстве.
Шпиндель ременной ВТ30	1-2,5кВт	2000 об/мин	Нет	34607 р.	Роликовые подшипники обеспечивают высокую нагрузочную способность и жесткость ротора, движение задает зубчатый шкив с профилем 5М. Крепление на плоскость.
Шпиндель ременной ВТ30-АТС-90	До 4,5кВт	6000 об/мин	Есть	93103 р.	Система АТС позволяет автоматизировать смену инструмента, тем самым экономя время оператора на станке. Для АТС можно использовать гидравлический, пневматический или иной цилиндр, который будет развивать нужное усилие.

## Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6
Шпиндель ременной ВТ30-АТС-90С	До 4,5кВт	6000 об/мин	Есть	97014 р.	В роторе сделано отверстие для подачи СОЖ (сжатого воздуха для очистки конуса). Фланцевое крепление. Базирование по цилиндрической поверхности корпуса.
Шпиндель ременной ТДВ5.5	5,5кВт	12000 об/мин	Есть	119933 р.	Фрезерный шпиндельный узел ременным приводом и конусом ВТ серии ТДВ. Предназначены для построения фрезерных/сверлильных станков или конвейерной обработки деталей на производстве.

## 2.2 Шпиндели со встроенным мотором

Шпиндель со встроенным мотором состоит из установленного на подшипниках шпиндельного вала, системы зажима инструмента и мотора, который в свою очередь зафиксирован в корпус шпинделя, гарантируя при этом работу на высоких скоростях вращения. Мощность этих шпинделей равна мощности мотора. У электро-шпинделей величина момента, мощности и скорости увеличивается только за счет характеристик мотора. Обычно на высокоскоростные шпиндели устанавливают асинхронные двигатели. [9]

Шпиндели должны изготавливаться в соответствии с требованиями настоящего стандарта и технических условий на конкретные типы шпинделей по рабочим чертежам, утвержденными в установленном порядке. Номинальная мощность на валу должна составлять от 0,01 до 55 кВт. [10]

Современные высокоскоростные шпиндели могут достигать 60000 об/мин, и чтобы исключить перегрев от высоких нагрузок фрезерные электро-шпиндели дополнительно снабжаются специализированной системой охлаждения. Встраивается она для того, чтобы при механической обработке металла не нагревалась насадка, через которую передается

высокая температура шпинделю, и не увеличивалась температура самого шпинделя. Выделяют воздушный и жидкостный типы охлаждения. [11]

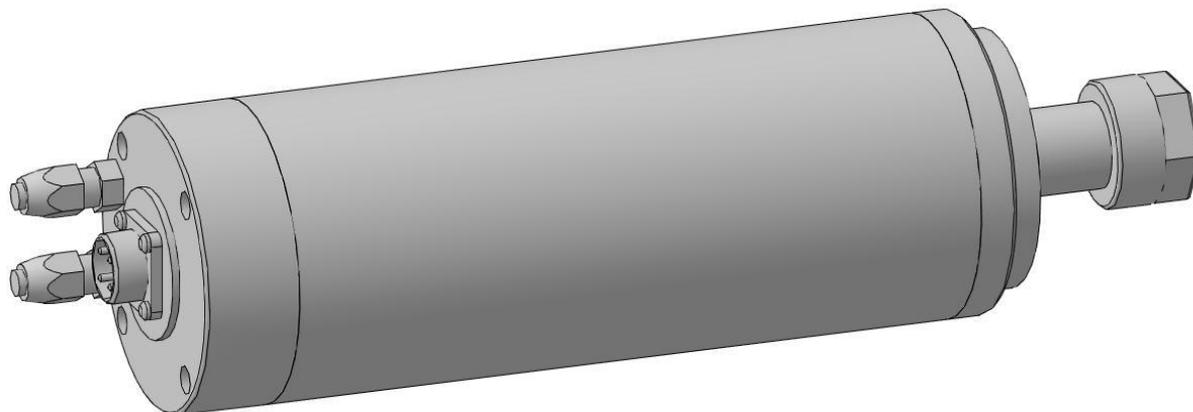


Рисунок 2 – Шпиндель жидкостного охлаждения

Шпиндель жидкостного охлаждения представлен на рисунке 2, устройство которого зачастую применяется в высококачественных промышленных станках на отечественных предприятиях. Доступно данное устройство на мировом рынке как от европейских, так и от китайских изготовителей.

Мотор водяного шпинделя охлаждается под давлением в основном водой или тосолом. В комплект шпинделя входят высокоскоростные железные подшипники, которые в последующем времени не требуют дополнительного обслуживания, насос, жидкостная емкость, штуцеры для подачи и отвода охлаждающей жидкости, которые соединяются с емкостью гибкими шлангами. Рабочий инструмент крепится в цанги и фиксируется гайкой. Для эффективной работы шпинделя с водяным охлаждением главным требованием является соблюдение герметичности системы. Важно отследить этот факт еще на этапе монтажа компонентов. [12]

Преимущества шпинделей жидкостного охлаждения:

– отличительной особенностью шпинделей с жидкостным охлаждением является то, что они работают существенно тише и издают минимальный шум. Это преимущество позволяет работать со станком, в котором установлен шпиндель водяного охлаждения на домашних условиях, где необходим низкий уровень шума;

– используются при выполнении работ с материалами, которые склонны к пылеобразованию и стружкообразованию;

– регулировка высоты шпинделя. Этот критерий позволяет практиковать работы с длинными фрезами и крупными заготовками;

– качественное, равномерное и стабильное охлаждение двигателя на протяжении всей работы шпинделя.

Недостатки шпинделей жидкостного охлаждения:

– большая вероятность возникновения коррозии вследствие эксплуатации в частом использовании воды, как охлаждающей жидкости;

– необходимость приобретения большого количества дополнительного оборудования к шпинделю;

– высокая стоимость оборудования, так как эта система включается в себя большое количество компонентов.

Рассмотрим некоторые модели шпинделей с жидкостным охлаждением, данные указаны в таблице 2.2

Таблица 2.2 – Классификация моделей водяных шпинделей

Модель	Мощность	Напряжение питания	Скорость вращения	Цена	Дополнительно
1	2	3	4	5	6
QW0.3	300Вт	75В	10000-60000 об/мин	27574 р.	Высокоскоростной низковольтный трехфазный шпиндель, который используется для фрезерно-гравировальных работ на высоких скоростях. Обрабатывает дерево, пластик, так и мягкие металлы.

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4	5	6
GDZ-24-1	3200Вт	220В	24000 об/мин	42086 р.	Трехфазный шпиндель с жидкостным охлаждением, работающий на высоких скоростях серии GDZ марки HANQI. При выходе из строя подшипников, шпиндель меняют целиком, так как стоимость ремонта обходится дорого. Применяется шпиндель для работы по мягким материалам.
GDK105-21Z/3.5	3500Вт	220/380В	21000 об/мин	61850 р.	Шпиндели с жидкостным охлаждением серии GDK зарекомендовали себя в работе по алюминию, цветным металлам, пластику и текстолиту. Имеют трехфазный асинхронный тип двигателя, металлокерамические подшипники класса P4 и более проработанный корпус.
GDZ-125-4.5	4500Вт	380В	24000 об/мин	68319 р.	Данная модель фрезеровочного шпинделя имеет в себе увеличенное число пар полюсов асинхронного двигателя, что в итоге снижает скорость вращения и увеличивает крутящий момент, тем самым хорошо подходит для высокоскоростной обработки.

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4	5	6
DX80-24/2.2TMP	2200Вт	220В	24000 об/мин	30524 р.	Шпиндель данной модели произведены компанией GMT. Являются высокоскоростными и высококачественными агрегатами за относительно невысокую стоимость. В шпинделе стоят подшипники класса SKF. Подходят для обработки дерева, текстолиту и пластику.
TDK80-1.5C-24K	1500Вт	220В	24000 об/мин	15048 р.	Высокоскоростной шпиндель бюджетного исполнения с водяным охлаждением производства компании TDK. Подходит для широкого спектра выполнения работ по дереву, пластику, алюминию и МДФ.

Перейдем к рассмотрению следующего типа шпинделей со встроенным мотором – это шпиндель с системой воздушного охлаждения, представленный на рисунке 3.

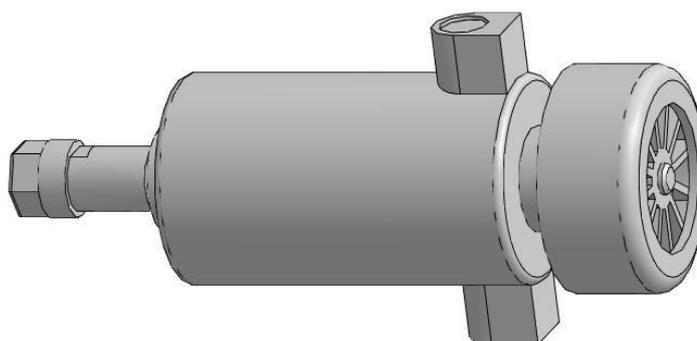


Рисунок 3 – Шпиндель воздушного охлаждения

Шпиндели с воздушной системой охлаждения зарекомендовали себя как дешевые и надежные устройства, отлично подходящие для фрезерных станков с числовым программным управлением. В силу своих крупных габаритов конструкции и хорошей выносливости инструмента, рассчитана в основном данная система на обработку материалов, не вызывающих перегрев двигателя, такие как дерево, пластик, ПВХ и другие. В противном случае, при сильном нагревании происходит удлинение ротора и засорение стружкой охлаждающей рубашки, что потребует частой прочистки. [13]

Система охлаждения воздушных шпинделей работает посредством передачи воздушных потоков по каналам, находящимся непосредственно внутри конструкции, выдувая стружку и пыль из зоны резания. Циркуляцию воздуха обеспечивает крыльчатка, которая находится на верхнем валу фрезерного шпинделя. Данная система чувствительна к внешней температуре воздуха, что при несоблюдении правил эксплуатации может привести к перегреву шпинделя. Но чтобы этого не возникало встраивают термодатчики, которые можно ввести в ЧПУ контроллер.

Преимущества шпинделей с воздушным охлаждением:

- простая и удобная в использовании конструкция, без дополнительного оборудования;
- относительно низкая цена;
- за счет своей массивной конструкции способны подавлять исходящие вибрации;
- цанговый зажим большого размера позволяет открывать больше возможностей в выборе инструмента;
- долговечные.

К недостаткам воздушных шпинделей относятся:

- высокий уровень шума;
- массивные габариты не позволяют отрегулировать высоту шпинделя, что достаточно неудобно при обработки больших заготовок;

- чувствительность шпинделя к окружающей температуре;
- скоростной режим ограничен снизу (не менее 8000 об/мин), так как при низких оборотах шпиндель становится не эффективным, плюс ко всему этому может произойти, перегрев мотора.

Рассмотри конкретные модели шпинделей с воздушной системой охлаждения, данные указаны в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Классификация моделей воздушных шпинделей

Модель	Мощность	Напряжение питания	Скорость вращения	Цена	Дополнительно
1	2	3	4	5	6
Two Win 3kw air-cooled spindle	3000Вт	220/380В	18000 об/мин	18500 р.	Асинхронный высокоскоростной шпиндель изготовленный компанией Two Win. Квадратный корпус выполненный из нержавеющей стали. Регулировка скорости вращения шпинделя ручная. Низкий уровень шума. Подшипники класса P4. Применяется для гравировки и работы по дереву, ПВХ, пластику, также по алюминию и мягким металлам.
TDK65-1.2F-24K	1200Вт	220В	15000 об/мин	15423 р.	Бюджетная серия фрезерных воздушных шпинделей, применяемых для обработки дерева, пластика и относительно мягких материалов на фрезерно-гравировальных станках с ЧПУ. В шпинделе установлены подшипники UTE класса P4.

Продолжение таблицы 2.3

1	2	3	4	5	6
GDF-46-18Z/1.5	1500Вт	220/380В	18000 об/мин	26454 р.	Шпиндель с воздушным охлаждением, работающий на высоких скоростях, разработанный компанией HANQI. Трехфазный асинхронный тип двигателя. Предназначены для фрезеровки и гравировки дерева, пластика, текстолита и другим материалам.
AS-800	800Вт	220В	До 24000 об/мин	43142 р.	Высокоскоростной воздушный шпиндель для фрезерного станка с ЧПУ. Данная модель изготовлена компанией GMT, обладающая высокой культурой производства и стабильным качеством. Тип двигателя-трехфазный асинхронный. Работает по пластику, дереву и мягким металлам.
SFM2825B-24/0.80TMP	800Вт	220В	До 24000 об/мин	36785 р.	Высокоскоростной китайский шпиндель воздушного охлаждения производства GMT. В данных моделях GMT используются дуплексные металлокерамические подшипники класса P4. Применяются для обработки дерева, пластика, воска и гравировки по металлу.

### 3 Сравнительный анализ шпинделей

#### 3.1 Сравнительный анализ приводов шпинделей

Основное назначение шпинделя заключается не только в безопасном и прочном закреплении режущего инструмента, но и в передаче ему вращательного движения. «Приводом называется устройство, которое служит для приведения в движение исполнительных органов станка. Силовым агрегатом привода какой-либо вид энергии преобразовывается в механическую работу». [14, с.1] Первое, что необходимо при выборе шпинделя – это подбор типа привода: с внешним или встроенным мотором.

Для повышения производительности при фрезеровании всевозможных поверхностей разрабатывают и внедряют высокоскоростные обработки материалов. Низкоскоростные же, которыми считаются шпинделя с частотой вращения до 12000 об/мин, также пытаются усовершенствовать и повысить коэффициент производительности. Но при сравнительном анализе высокоскоростных и низкоскоростных шпинделей было исследовано влияние изменения скорости вращения шпинделей во время фрезерования при различных условиях резания. В момент исследования на шпиндель оказывали напряжение в 100 Гц и 470 Гц с крутящим моментом 250 Н·м и 500 Н·м. Как правило, большие диаметры фрез используются для применения при низких скоростях вращения, а для высокоскоростной обработки подходят фрезы малых размеров. Таким образом, диаметры фрезы менялись с изменением скорости вращения шпинделя. [15, 16] Предполагалось, что система привода обеспечивала постоянную скорость. В таблице 3.1 представлены скорости вращения и соответствующие им диаметры фрезы, используемые для анализа.

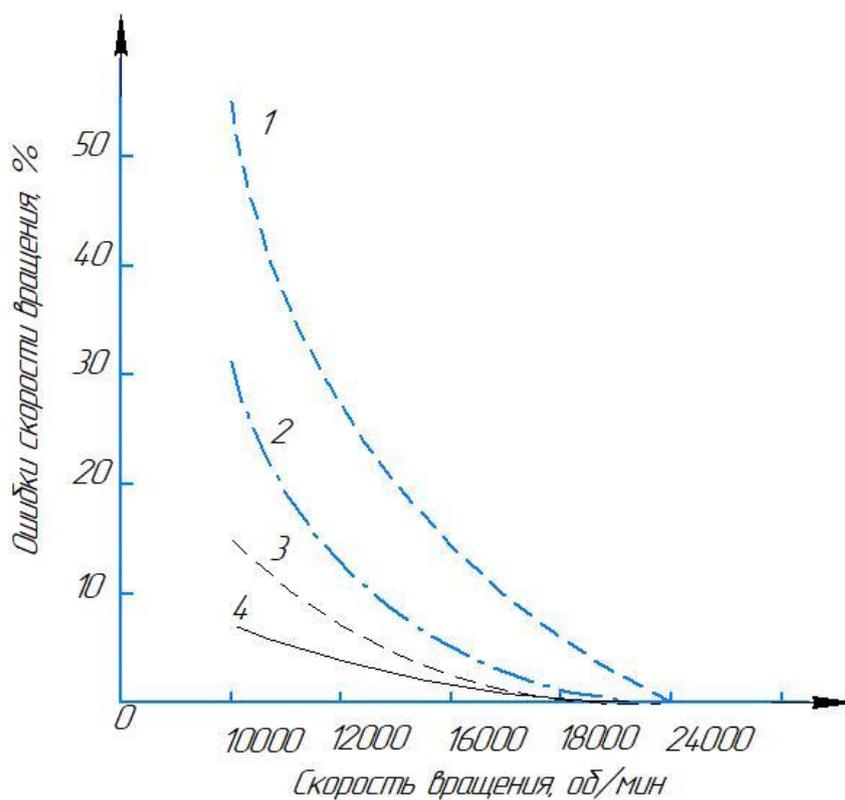
Таблица 3.1 – Скорости вращения и соответствующие им диаметры фрез

Диаметр фрезы, мм	Скорость вращения, об/мин
1	2
75	10000

Продолжение таблицы 3.1

1	2
60	12000
40	16000
30	18000
25	24000

После ряда проведенных экспериментов данные были проанализированы путем наблюдения изменений скорости на фоне нарушения крутящего момента. На рисунке 4 представлен график ошибок скорости вращения в процессе фрезерования на различных условиях работы.



1 – 500 Н·м, 100 Гц; 2 – 250 Н·м, 100 Гц;  
3 – 500 Н·м, 470 Гц; 4 – 250 Н·м, 470 Гц

Рисунок 4 – График ошибок скорости вращения на различных условиях работы

На графике наглядно показано, что ошибок значительно больше, когда для обработки выбирают более низкие скоростные режимы. При напряжении в 100 Гц и крутящем моменте 500 Н·м вероятность возникновения ошибки достигает 55%, что полностью может повлиять на параметры процесса обработки детали. Такие отклонения при фрезеровании на низких скоростях лучше не игнорировать, что нельзя сказать про высокоскоростную обработку, где скоростные режимы в стабильном состоянии. Для того чтобы добиться в работе высокоскоростной обработки необходимо использовать шпиндель со встроенным приводом, так как внешний привод шпиндельного узла не справляется с такой труднодостижимой задачей. [17]

В современных методах фрезерования предъявляются повышенные требования в точности, частоте и времени обработки поверхностей заготовки. В получении наилучшего результата главным препятствием являются вибрации в работе шпинделя с ременным приводом, а также ограничения по скорости вращения и ослабление нагрузочной способности подшипников. Эти критерии не позволяют получать хорошие результаты с внешним приводом, которые можно достигнуть со встроенным мотором.

Существенным достоинством приводов главного движения настольных фрезерных станков является возможность регулировки частоты вращения шпинделя с помощью изменения показателей частоты питающего электричества. Допускает это сделать управление приводом системой ЧПУ. На этих станках выполняется черновая и чистовая обработка заготовок всевозможных размеров и материалов, следовательно, используются в работе различные режущие инструменты. Для этого ряда функций требуются разные режимы работы и широкий диапазон регулирования частоты вращения шпинделя. Поэтому для удовлетворения повышенных требований все чаще получают одобрение шпиндели с приводом, который встроен в них. Одним из них является асинхронный высокоскоростной электродвигатель.

Конструкция шпинделей со встроенным мотором позволяет изготавливать их компактных размеров, в отличие от шпинделей с внешним

приводом, у которых большие габариты. Уменьшение размеров и веса шпинделей способствовало к массовому выпуску станков настольного исполнения. И практически во всех таких моделях внедряется система ЧПУ, что приводит к улучшению качества работы на станке. А сами шпиндели со встроенным мотором для современных станков с ЧПУ стали одной из главных составляющих нынешних сервоприводов, которые управляются с помощью умной электроники.

### **3.2 Сравнительный анализ охлаждающей системы**

При обработке заготовок на фрезерных станках шпинделями со встроенным приводом выделяется повышенное количество тепла от фрезы и от самого шпинделя, детали которого нагреваются от нагрузок режущего инструмента и от трения в подшипниках. [18] При использовании же шпинделей с внешним приводом отвода тепла не требуется. Нужно охлаждать только лишь режущий инструмент.

Система СОЖ выполняет функцию охлаждения рабочего инструмента, используется как в шпинделях со встроенным приводом, так и в шпинделях с внешним приводом. А вот воздушное или жидкостное охлаждение самого шпинделя применяется только в электрических моделях, служит для устойчивой и надежной работы.

Какой все таки вид охлаждения больше подходит – с воздушным или же с водяным охлаждением. Каждый из них обладает своими преимуществами и недостатками. При выборе необходимо опираться на условия работы, с которыми нужно будет справиться одной из систем охлаждения.

От одного из первых показателей, от которого отталкивается выбор охлаждающей системы, является цена на устройство. В некоторых случаях стоимость на воздушный шпиндель несколько выше, чем у водяного аналога с схожими характеристиками. Но если необходимо выполнять более простой уровень и небольшой объем работы, то существуют многие бюджетные

модели воздушных шпинделей, которые отлично справляются с поставленными задачами. К тому же к шпинделям с водяным охлаждением необходимо приобрести дополнительное оборудование, которое занимает много места, усложняет процесс обработки и требует отдельной оплаты. На рисунке 5 представлена сложная система подключения шпинделя с жидкостным охлаждением.

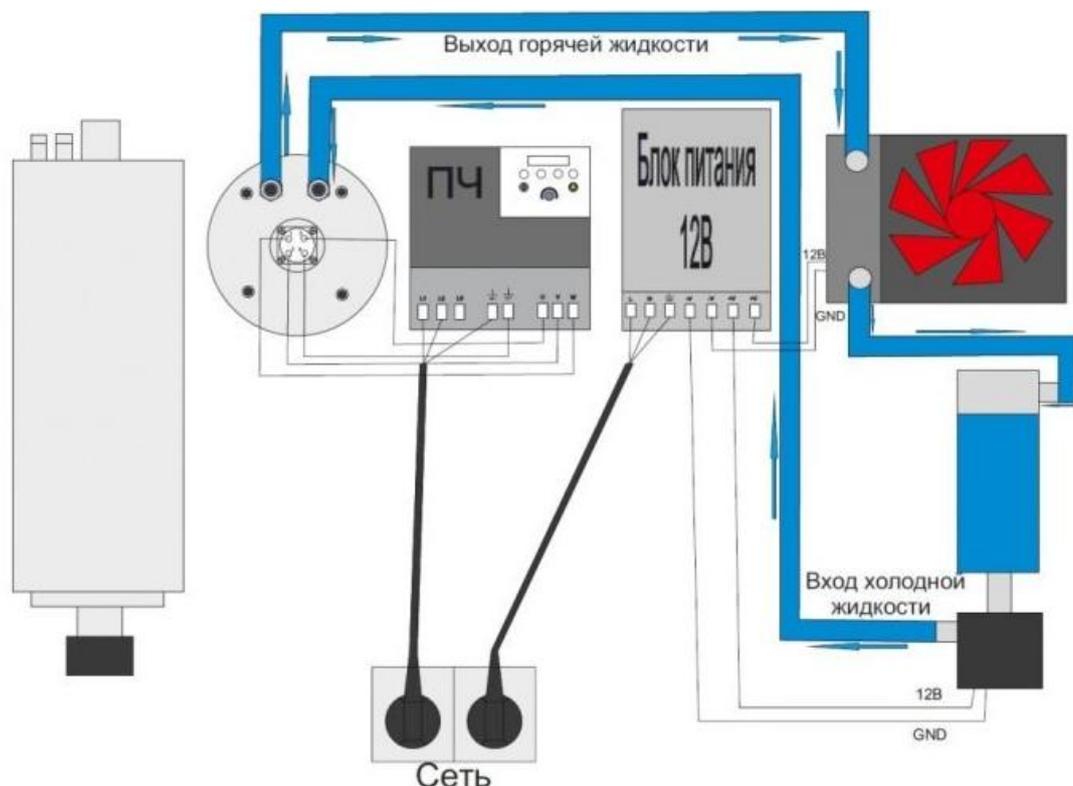


Рисунок 5 – Схема подключения шпинделя с жидкостным охлаждением

В добавок к дополнительному оборудованию существенным недостатком шпинделей с водяным охлаждением является возникновение коррозии внутри охлаждающей рубашки, что может вызвать попадание охлаждающей жидкости внутрь обмоток с последующим полным выходом из строя. Для уменьшения вероятности коррозии в качестве охлаждающей жидкости используют дистиллированную воду, тосол или антифриз, которые почти не вызывают ржавчину внутренних деталей шпинделя. [19]

Следующее, с чем сталкиваешься при выборе шпинделя – это обработку какого материала предстоит выполнить, и соответственно какая охлаждающая система под нее подойдет. Для обработки заготовок из пластика, дерева, ПВХ, воска, мягких металлов и прочих не вызывающих перегрев двигателя материалов рекомендуется использовать шпиндели с воздушным охлаждением у которых скоростной режим не достигает 24000 об/мин. А для работы на высоких скоростях от 20000 об/мин до возможно максимальных с более прочными материалами, такими как сталь, твердые металлы, их сплавы, драгоценные камни и другие подобные, применяются шпиндели с жидкостным охлаждением.

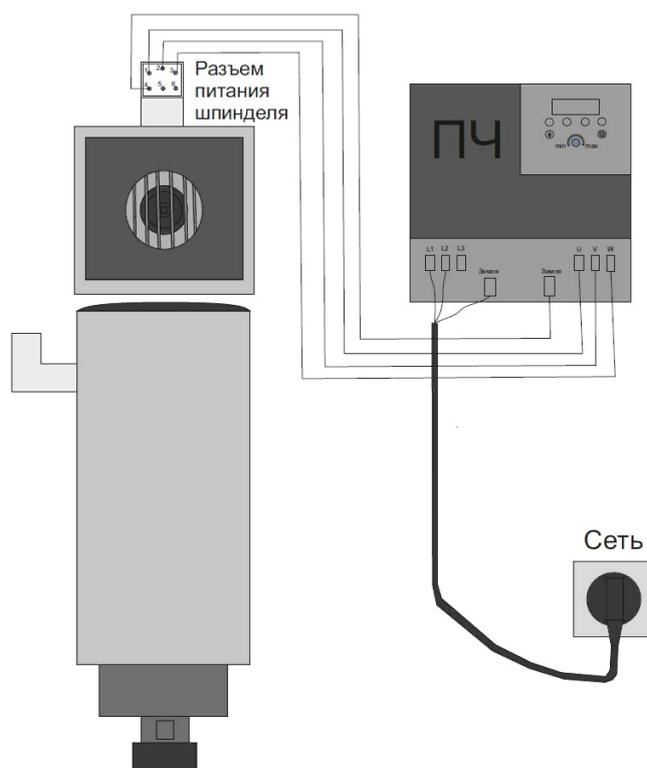


Рисунок 6 – Схема подключения воздушного шпинделя

На рисунке 6 показана простая в эксплуатации схема подключения шпинделя с воздушным охлаждением – это еще одно преимущества перед водяным шпинделем.

Несмотря на то, что шпиндели с воздушным охлаждением чувствительны к температурной среде и чистоте окружающего воздуха,

условия работы, указанные в пункте 1.1 позволяют использовать в данном помещении шпиндель именно с этой системой охлаждения. Единственным неисправимым недостатком является высокий уровень шума, который издает вращающаяся крыльчатка, и он в разы выше, чем у водяных аналогов. [20]

### 3.3 Сравнительный анализ моделей шпинделей с воздушным охлаждением

После выбора охлаждающей системы следующее, что необходимо сделать – это выбрать конкретную подходящую модель для обработки при заданных условиях работы. При анализе и в дальнейшем выборе модели шпинделя с воздушным охлаждением будем опираться на условия работы в пункте 1.1. Для сравнительного анализа возьмем все представленные модели шпинделей воздушного охлаждения из таблицы 2.3 и проведем его по следующим критериям: мощность устройства, его стоимость, скорость вращения, размер конструкции, точность вращения и уровень звука. [21] Сведем эти данные в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Характеристики моделей воздушных шпинделей

Модель	Наличие критерий (баллы от 0 до 10)						
	мощность	стоимость	скорость вращения	размер	точность вращения	уровень звука	Итого:
Two Win 3kw air- cooled spindle	10	9	10	9	10	10	58
TDK65- 1.2F-24K	8	7	10	7	8	7	47
GDF-46- 18Z/1.5	9	8	9	9	9	9	53
AS-800	7	9	6	8	9	10	49
SFM2825B- 24/0.80TMP	7	8	7	8	10	9	49

Из анализа диаграммы представленной на рисунке 7 видно, что модели TDK65-1.2F-24K, AS-800 и SFM2825B-24/0.80TMP из всех рассмотренных моделей недостаточно хороши для применения. Данный анализ использовался в работе с целью оценки различных моделей выбранного вида шпинделей, а также для выявления подходящего конкретного шпинделя для обработки различных заготовок.

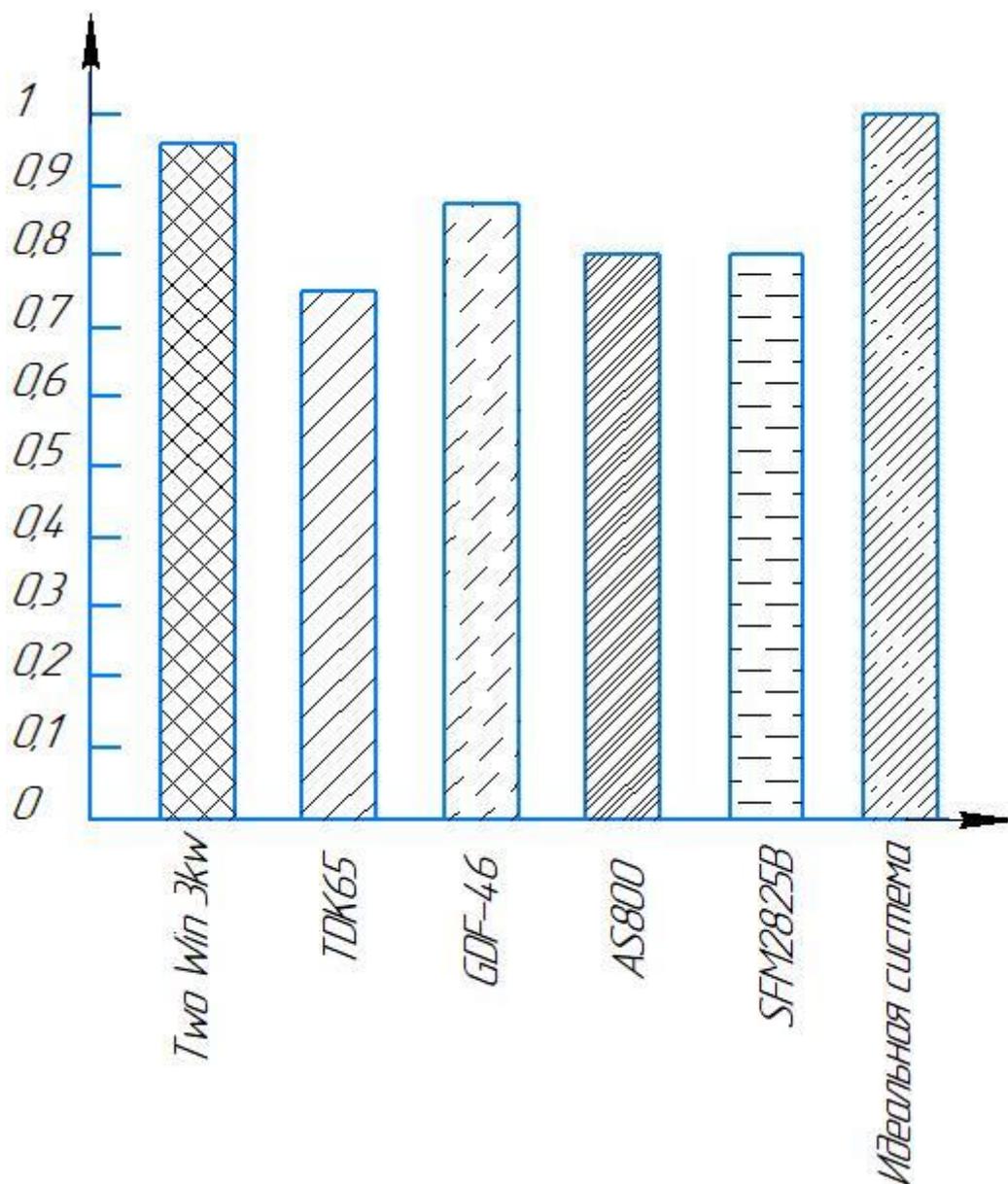


Рисунок 7 – Оценка моделей воздушных шпинделей

Рассмотрим две модели, которые получили наивысшие оценки GDF-46-18Z/1.5 и Two Win 3kw air-cooled spindle, что показывает их конкурентоспособность и высокий технический уровень.



Рисунок 8 – Воздушный шпиндель GDF-46-18Z/1.5

На рисунке 8 представлен шпиндель с воздушным охлаждением GDF-46-18Z/1.5. Данная модель применяется в фрезерно-гравировальных станках с числовым программным управлением. Используется в обработки дерева, графита, воска, пластмассы, МДФ и прочих мягких материалов. Цилиндрический корпус позволяет использовать обыкновенные алюминиевые держатели шпинделей, и к тому же комфортно установить прижимы листовых материалов и систему аспирации. Смена инструмента производится вручную. Основные характеристики представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики GDF-46-18Z/1.5

Характеристика	Описание
1	2
Мощность	1500 Вт

Продолжение таблицы 3.2

1	2
Диапазон оборотов	1000...18000 об/мин
Тип цанги	ER11
Тип двигателя	Асинхронный трехфазный
Биение	3...5мкм
Внешний диаметр	60 мм
Термодатчик	Нет
Термопредохранитель	Нет
Тип подшипников	2×7002С Р4 2×7000С Р4
Цена	26454 р.

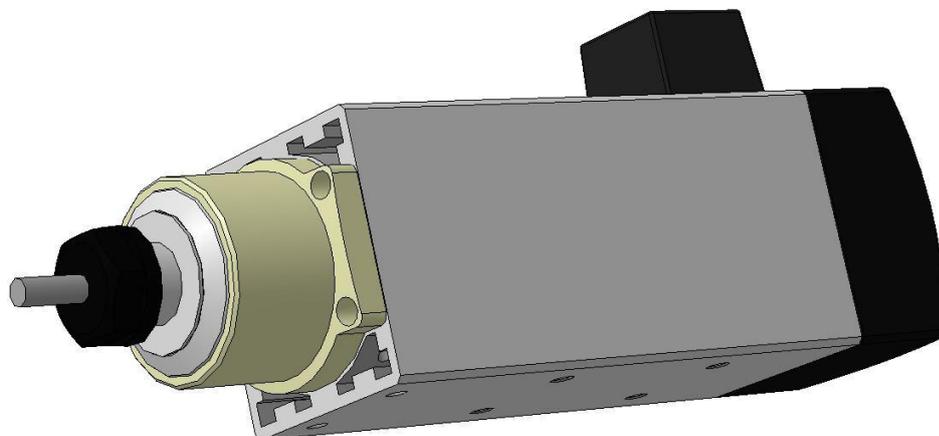


Рисунок 9 – Воздушный шпиндель модели Two Win 3kw air-cooled spindle

Шпиндель воздушного охлаждения модели Two Win 3kw air-cooled spindle китайской компании Two Win, представленный на рисунке 9, является надежным и относительно недорогим решением для фрезерных станков с ЧПУ. Выполнен корпус из нержавеющей стали и оснащен ручной

регулировкой скорости вращения шпинделя. Применяется для гравировки и работы по дереву, ПВХ, пластику, также по алюминию и мягким металлам. Диапазон обрабатываемых материалов немного больше, чем у TDK65-1.2F-24K. Основные характеристики представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Технические характеристики модели Two Win 3kw air-cooled spindle

Характеристика	Описание
Мощность	3000 Вт
Диапазон оборотов	8000...18000 об/мин
Тип цанги	ER20
Тип двигателя	Асинхронный трехфазный
Биение	3...5 мкм
Внешний диаметр	148 мм
Термодатчик	Есть
Термопредохранитель	Есть
Тип подшипников	2×7005С Р4 DT 2×7003С Р4 DT
Цена	18500 р.

Шпиндель, оснащенный цангой ER 20 позволяет зажимать инструменты от 1 мм до 12,7 мм, чего нельзя сказать про цангу ER11, где максимальный возможный диаметр зажимаемого инструмента 8 мм. К тому же тип подшипников модели Two Win 3kw air-cooled spindle на порядок качественнее и долговечнее, чем у модели GDF-46-18Z/1.5.

Несмотря на небольшую разницу в стоимости устройств, Two Win 3kw air-cooled spindle по многим показателям превышает по функциональности, безопасности и качеству модель GDF-46-18Z/1.5 и является полностью соответствующей моделью для работы на фрезерном станке с ЧПУ.

## 4 Безопасность и экологичность технического объекта

### 4.1 Конструктивно-технологическая характеристика объекта

Сведения о материалах, операциях и оборудовании, используемом в технологическом процессе, представлены в таблице 4.1. [22]

Таблица 4.1 – Технологический паспорт объекта

Технологический процесс	Технологическая операция, вид выполняемых работ	Наименование должности работника, выполняющего технологический процесс, операцию	Оборудование, техническое устройство, приспособление	Материалы, вещества
Лезвийная обработка	Фрезерование	Оператор станков с числовым программным управлением	Трёхкоординатный фрезерный станок с ЧПУ	Дерево

### 4.2 Идентификация профессиональных рисков

Таблица 4.2 – Идентификация профессиональных рисков

Производственно-технологическая и/или эксплуатационно-технологическая операция, вид выполняемых работ	Производственно-технологическая и/или эксплуатационно-технологическая операция, вид выполняемых работ	Производственно-технологическая и/или эксплуатационно-технологическая операция, вид выполняемых работ
ТП фрезерование	Физические: движущиеся машины и механизмы	Вращающийся шпиндель станка, заготовка и режущий инструмент
	Повышенная температура поверхностей оборудования	Поверхность заготовки и инструмента
	Перенапряжение анализаторов, опасность поражения электрическим током, повышенный уровень шума на рабочем месте	Экраны стойки управления, ток в электрической цепи, к которой подключен станок, воздушный шпиндель

### 4.3 Методы и средства снижения профессиональных рисков

Таблица 4.3 – Методы и средства снижения негативного воздействия опасных и вредных производственных факторов

Опасный и/или вредный производственный фактор	Организационно-технические методы и технические средства защиты, частичного снижения, полного устранения опасного и/или вредного производственного фактора	Средства индивидуальной защиты работника
Нагрев поверхности	Надежная изоляция от повреждений, проведение инструктажа	При контакте с заготовкой использовать защитные ухваты, фартук
Повышенный шум, запыленность и стружка на рабочем месте	Оператор находится на расстоянии от станка и производит только установку и выгрузку заготовок и обработанных деталей, внедрение средств вентиляции и пылесборников	Наушники защитные, беруши или противозумные вкладыши. Использовать защитные очки и фартук
Опасность поражения электрическим током	Надежная изоляция электропроводки, наличие предохранителей, ограждение и электрическое заземление оборудования	Костюм и брюки из хлопка или вискозы, кожаные ботинки, перчатки с полимерным покрытием
Перенапряжение анализаторов	Увеличение времени перерывов	-

#### 4.4 Обеспечение пожарной безопасности технического объекта

Класс пожара, информация о технических средствах борьбы с пожаром и организационно-технические мероприятия представлены в таблицах 4.4-4.6. [23].

Таблица 4.4 – Идентификация классов и опасных факторов пожара

Участок, подразделение	Оборудование	Класс пожара	Опасные факторы пожара	Сопутствующие проявления факторов пожара
Фрезерный	Трехкоординатный фрезерный станок с ЧПУ	D	Повышенная температура, большая концентрация ядовитых продуктов горения	Взрыв и его факторы возникающие, когда пожар уже произошел. Выбросы, которые попадают в атмосферу при пожаре

Таблица 4.5 – Технические средства обеспечения пожарной безопасности

Первичные средства пожаротушения	Мобильные средства пожаротушения	Стационарные установки системы пожаротушения	Средства пожарной автоматики	Пожарное оборудование
Песок, огнетушитель с порошком	Пожарная мотопомпа	Система тушения пожара помощью аэрозолей	Тепловые	Огнетушители

СИЗ и эвакуация граждан при возгораниях	Пожарный инструмент (механизированный и немеханизированный)	Пожарные сигнализация, связь и оповещение
Респираторы, противогазы находящиеся на производстве	Лопата, багор, песок в ведре	Оповещатели противопожарные

Таблица 4.6 – Организационные (организационно-технические) мероприятия по обеспечению пожарной безопасности

Наименование технологического процесса	Наименование видов реализуемых организационных (организационно-технических) мероприятий	Предъявляемые требования по обеспечению пожарной безопасности, реализуемые эффекты
ТП фрезерование	Организация пожарной охраны, проведение инструктажа для сотрудников. Опасные вещества необходимо верно хранить и перевозить согласно инструкции	Предотвращение пожара путем максимально возможным ограничением массы объема горючих материалов. В помещениях в которых хранятся опасные вещества, необходимо следить за качеством, давлением и градусом воздуха, таким образом утилизация отходов будет проходить максимально безопасно, что будет препятствовать пожару

#### 4.5 Обеспечение экологической безопасности рассматриваемого технического объекта

После распознавания классов, отрицательных воздействий и опасных факторов в технологическом процессе, разрабатываем перечень мероприятий по устранению экологических проблем (таблицы 4.7-4.8).

Таблица 4.7 – Идентификация негативных экологических факторов технического объекта

Наименование технического объекта, производственно - технологического процесса	Структурные составляющие технического объекта, производственно-технологического процесса	Воздействие технического объекта на атмосферу	Воздействие технического объекта на гидросферу	Воздействие технического объекта на литосферу
1	2	3	4	5

Продолжение таблицы 4.7

1	2	3	4	5
ТП фрезерование	Трехкоординатный фрезерный станок с ЧПУ	–	–	Образование отходов в виде стружки дерева

Воздействия технического объекта на атмосферу и гидросферу не имеются, в связи с тем, что технологический процесс фрезерования не требует применения смазывающе-охлаждающей жидкости.

Таблица 4.8 – Разработанные организационно-технические мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия технического объекта на окружающую среду

Наименование технического объекта	ТП фрезерование
1	2
Мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия на атмосферу	–
Мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия на гидросферу	–
Мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия на литосферу	Утилизация стружки

#### **4.6 Заключение по разделу «Безопасность и экологичность технического объекта»**

В данном разделе мы рассматриваем технологический процесс фрезерования, представлены его характеристики, обращено внимание на миссии работников во время работы на производственных и инженерно-технических оборудованьях, перечислено используемое технологическое сырье, которое входит в состав расходного материала. (таблица 4.1).

Во время производимых работ происходит процесс фрезерования, при выполнении которого были выявлены профессиональные риски (таблица 4.2) и разработаны мероприятия по снижению и устранению их, подобраны средства защиты для работников (таблица 4.3).

Созданы мероприятия по обеспечению пожарной безопасности технического объекта. Выполнена идентификация класса пожара и опасных факторов пожара и разработка средств, методов и мер обеспечения пожарной безопасности (таблица 4.4). Разработаны средства, методы и меры обеспечения пожарной безопасности (таблица 4.5). Подготовлены мероприятия по обеспечению пожарной безопасности на техническом объекте (таблица 4.6).

Идентифицированы экологические факторы (таблица 4.7) и созданы мероприятия по обеспечению экологической безопасности на техническом объекте (таблица 4.8).

В результате перечисленного выше анализа технологического процесса фрезерования сделан вывод о полном соответствии технического объекта требованиям производственной, пожарной и экологической безопасности.

## 5 Экономическая эффективность работы

### 5.1 Определение содержания и последовательности выполнения научно-исследовательской работы в дипломном проекте

В результате написания дипломного проекта научно-исследовательского направления уделялось большое внимание разработке методике исследования и определению последовательности выполнению отдельных этапов. [24] Выполненный перечень работ дипломного проекта приводим в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Приводимый перечень работ при выполнении дипломного проекта научно-исследовательского направления

Стадии проведения исследований	Этапы научно-исследовательской работы	Содержание проводимых работ
1	2	3
Подготовительная стадия	Выполнение комплекса подготовительных работ	1. Составление и получение задания на проведение НИР
		2. Сбор информации по теме исследования, литературный поиск
		3. Анализ состояния вопроса
		4. Предварительное технико-экономическое обоснование проведения исследований
Теоретическая разработка	Разработка теоретической части исследования	5. Изучение и анализ существующих подобных конструкций, материалов, способов производства
		6. Составление и согласование разработанной методики проведения исследований с ранее изложенными
		7. Теоретические исследования и определение путей решения задачи о обоснованном выборе приспособления

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3
Экспериментальные работы	Разработка чертежей, проведение комплекса экспериментальных работ	8. Проведение экспериментальных исследований и испытаний в целях проверки и уточнения принятых теоретических решений
		9. Получение окончательных результатов проведения экспериментальных исследований
		10. Оценка представленных моделей
		11. Выбор приспособления
Заключительная стадия	Обобщение, выводы и предложения	12. Сравнительный анализ полученной информации.
		13. Оформление результатов исследований.
		14. Оформление конструкторской и технологической документации
		15. Определение возможности использования результатов исследований в дальнейших разработках.
		16. Написание пояснительной записки с учетом замечаний консультантов и руководителя дипломного проекта

## 5.2 Определение трудоемкости и длительности цикла выполнения научно-исследовательской работы.

Трудоёмкость проведения научно-исследовательской работы в большом количестве случаев определяется экспериментами или по эмпирическим формулам, полученным в итоге проведения экспериментального пути. Основой такого метода расчета трудоёмкости является то, что трудоёмкость представляется как функция от длительности цикла её проведения и количества работников.

$$T = f \times (D_{\text{ц}} \times P); \quad (1)$$

где  $D_{\text{ц}}$  – длительность цикла выполнения научно-исследовательской работы, дни;

$P$  – количество участников, действующих при выполнении НИР.

Определение трудоемкости в выполнении каждой работы проводим на основании системы трех экспертных оценок ( $T_{\text{min}}$ ,  $T_{\text{max}}$ ,  $T_{\text{ож}}$ ). Параллельно производим распределение исполнителей по всем видам работ и расчет длительности цикла исполнения этапов и всей работы с учетом принятой численности участников.

Ожидаемую трудоемкость выполнения каждой работы ( $T_{\text{ож}}$ ) определяем по формуле:

$$T_{\text{ож}} = \frac{(3T_{\text{min}} + 2T_{\text{max}})}{5}; \quad (2)$$

где  $T_{\text{min}}$  – оптимистическая оценка трудоемкости;

$T_{\text{max}}$  – пессимистическая оценка трудоемкости.

Ожидаемая трудоемкость выполнения каждого этапа рассчитывается как сумма трудоемкости выполнения входящих в данный этап работ

Зная ожидаемую трудоемкость выполнения работ и этапов, рассчитываем длительность цикла их выполнения с учетом численности участников, задействованных в проекте по формуле:

$$T_{\text{ц}} = \frac{T_{\text{ож}}}{P}; \quad (3)$$

Количество исполнителей, задействованных в проведении научно-исследовательской работы принимаем равным  $P = 2$  человека. Результаты расчета представим в виде таблицы 5.2.

Таблица 5.2 – Расчет трудоемкости и длительности цикла выполнения НИР

№ этапов	№ работ	Трудоемкость выполнения работ, дней			Численность работников.			Длительность выполнения работ и этапов с учетом численности работников, дней
		T <sub>min</sub>	T <sub>max</sub>	T <sub>ож</sub>	Руков. проекта	Студент	Итого	
1	2	3	4	5	6	8	9	10
1	1	2	7	4	1	1	2	2
	2	8	13	10	–	1	1	10
	3	12	17	14	1	1	2	7
	4	2	5,5	3	–	1	1	3
Итого:				31				22
2	5	8	13	10	1	1	2	5
	6	4	8,5	5	1	1	2	2,5
	7	1	4,5	2	1	1	2	1
Итого:				17				8,5
3	8	4	8,5	5	1	1	2	2,5
	9	8	13	10	1	2	2	5
	10	2	7	4	1	1	2	2
	11	10	15	12	1	1	2	6
Итого:				31				15,5
4	12	8	13	10	–	1	1	10
	13	8	13	10	–	1	1	10
	14	4	8,5	5	–	1	1	5
	15	2	5,5	3	–	1	1	3
	16	8	13	10	–	1	1	10
Итого:		30	53	38				38
Всего:				117				84

В нашем случае ожидаемая трудоёмкость выполнения всего комплекса научно-исследовательских работ и длительность цикла выполнения проекта с учётом численности исполнителей составляет 84 дня.

Для разработки сетевого графика необходимо предварительно составить перечень событий и работ. Все данные по выполнению работы представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Перечень событий и работ по выполнению НИР

№ событий	Наименование работ и событий	Шифр работ	Продолжительность работ, дни
0.	Решение о выполнении научно-исследовательской работы принято.		
1.	Составление (получения) задания на проведение НИР	0-1	2
2.	Сбор информации по теме исследования, литературный поиск	0-2	10
3.	Анализ состояния вопроса	2-3	7
4.	Предварительное технико-экономическое обоснование проведения исследований	3-4	3
5.	Изучение и анализ существующих подобных конструкций, материалов, способов производства	4-5	5
6.	Составление и согласование разработанной методики проведения исследований с ранее изложенными	4-6	2,5
7.	Теоретические исследования и определение путей решения задачи о обоснованном выборе приспособления	5-7	1
8.	Проведение экспериментальных исследований и испытаний в целях проверки и уточнения принятых теоретических решений	7-8	2,5
9.	Получение окончательных результатов проведения экспериментальных	8-9	5
10.	Оценка представленных моделей	8-10	2
11.	Выбор приспособления исследований	10-11	6
12.	Сравнительный анализ полученной информации.	11-12	10
13.	Оформление результатов исследований.	12-13	10
14.	Оформление конструкторской и технологической документации	12-14	5
15.	Определение возможности использования результатов исследований в дальнейших разработках.	13-15	3
16.	Написание пояснительной записки с учетом замечаний консультантов и руководителя дипломного проекта	15-16	10

### 5.3 Расчет ранних сроков свершения событий до оптимизации сетевого графика

Расчет ранних сроков свершения события определим по формуле:

$$T_{p+1} = T_{pi} + D_{i-(i+1)}, \text{ дни} \quad (4)$$

где  $T_{p+1}$  – ранний срок совершения событий, в которых приходит событие, дни;

$T_{pi}$  – ранний срок совершения событий, из которых выходит работа, дни;

$D_{i-(i+1)}$  – работа, затрачиваемая при переходе от одного события в другое.

Расчет поздних сроков совершения события вычисляется по формуле:

$$T_{п-1} = T_{пi} - D_{i-(i-1)}, \text{ дни}; \quad (5)$$

где  $T_{п-1}$  – поздний срок свершения событий, в которых приходит событие, дней;

$T_{пi}$  – поздний срок свершения событий, из которых выходит работа, дней;

$D_{i-(i-1)}$  – работа, затрачиваемая при переходе от одного события в другое.

Определяем резервы событий по формуле:

$$R_i = T_{пi} - T_{pi}, \text{ дни} \quad (6)$$

Рассчитаем длительность путей:

$T_1 = 69,5$  – критический;

$T_2 = 0 - 1 - 3 - 4 - 6 - 7 - 8 - 9 - 11 - 12 - 14 - 15 - 16 = 2 + 0 + 3 + 2,5 + 0 + 2,5 + 5 + 0 + 10 + 5 + 0 + 10 = 40$  – не напряжённый.



*Сетевой график (оптимизированный)*

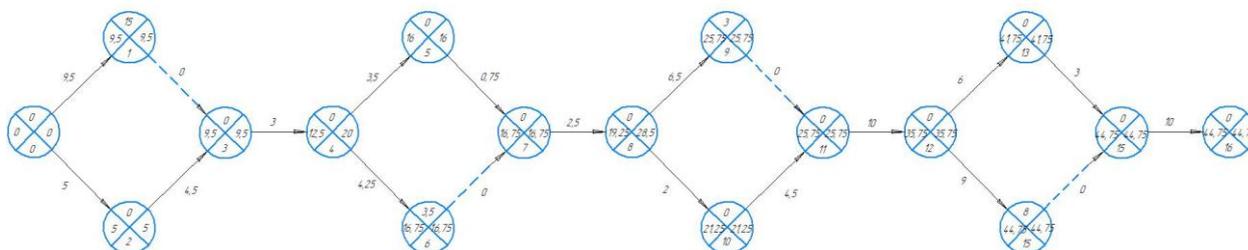


Рисунок 11 – Сетевой график после оптимизации

### 5.4 Определение состава и фонда заработной платы

Состав исполнительных участников по каждой теме проекта определяется штатным расписанием, в котором в одно время рассматривается и фонд заработной платы исполнителей. (Таблица 5.5)

Таблица 5.5 – Штатное расписание исполнителей и фонда заработной платы

Наименование должности	Численность, чел	Месячный оклад, руб	Средняя дневная ставка, руб	Количество отработанных дней	Сумма заработной платы, руб
Научный руководитель 15 разряд	1	18000	697,7	13	6977
Инженер (студент) 9 разряд	1	2500	83,3	71	5914,3
Итого					12891,3

Экономическая эффективность работы определяется общими затратами, которые содержат в себе все этапы, начиная от получения задания на выполнение бакалаврской работы и до завершения работы.

Общий объем затрат на выполнение работы составляет 12891,3 рубля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данной бакалаврской работы были выполнены и решены все поставленные задачи:

- проанализированы исходные данные, поставлены требования на деталь;

- исследованы виды приводов шпинделей, рассмотрены существующие системы охлаждения, приведены преимущества, недостатки, возможности и технические характеристики различных моделей шпинделей;

- проведен аналитический сравнительный анализ приводов шпинделей и выбран подходящий для работы на определенных условиях, в последующем сделан выбор охлаждающей системы;

- выполнена оценка моделей шпинделей с воздушным охлаждением путем сравнения основных критериев;

- обосновано выбран шпиндель для работы на фрезерном станке с ЧПУ на основе технических характеристик;

- разработаны мероприятия по противопожарной защите технического объекта;

- произведен расчет экономической эффективности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шестернинов, А.В. Конструирование шпиндельных узлов металлорежущих станков: учебное пособие / А.В. Шестернинов. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 96 с.
2. Особенности устройства электрического шпинделя. [Электронный ресурс]. – URL: <http://moscowshpindel.ru/stati/osobennosti-ustrojstva-elektricheskogo-shpindelya/> (дата обращения: 12.03.2019).
3. ГОСТ 17734 – 88. Станки фрезерные консольные. Нормы точности и жесткости. – Введ. 1988-13-06. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 34 с.
4. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. 656 с.– Т. 1.
5. Иноземцев, А.Н. Металлорежущие станки: учебное пособие / А.Н. Иноземцев – Тула: ТулГУ, 2002. – 183 с.
6. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Под ред. В.Н. Челомей – М.: Машиностроение, 1980 – Т.3. Колебания машин, конструкций и их элементов. 1980.– 544 с.
7. Низкоскоростные шпиндели. [Электронный ресурс]. – URL: <http://moscowshpindel.ru/stati/nizkoskorostnye-shpindeli/> (дата обращения: 25.03.2019).
8. The book of spindles. [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.scribd.com/document/85229016/Book-of-Spindles-Part-1> (дата обращения: 30.03.2019).
9. Шпиндель высокоскоростной. [Электронный ресурс] – URL: <http://moscowshpindel.ru/stati/shpindel-vysokoskorostnoj/> (дата обращения: 05.04.2019).
10. ГОСТ 14177-88. Шпиндели со встроенным приводом. Общие технические условия. – Введ. 1990-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 28 с.

11. Охлаждение шпинделя. [Электронный ресурс]. – URL: <http://moscowshpindel.ru/stati/oxlazhdenie-shpindelya/> (дата обращения: 5.04.2019).
12. Шпиндели с охлаждением жидкостью. [Электронный ресурс] – URL: <http://moscowshpindel.ru/stati/shpindeli-s-oxlazhdeniem-zhidkostyu/> (дата обращения: 15.04.2019).
13. Мотор-шпиндели. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.slf-fraureuth.de/wp-content/uploads/2015/11/MotorspindelInRUk.pdf> (дата обращения: 20.04.2019).
14. Привод. [Электронный ресурс]. – URL: <http://moscowshpindel.ru/stati/privod/> (дата обращения: 20.04.2019).
15. Soshia, Masakazu. Spindle rotational speed effect on milling process at low cutting speed / Masakazu Soshia, Nicholas Raymonda, Shinji Ishi // Procedia CIRP – 2014. – Vol. 14. P. 159-163.
16. Soshia, Masakazu. A study on the effect of rotational dynamic characteristics of a machine tool spindle drive on milling process / Masakazu Soshia, Shinji Ishiia, Kazuo Yamazakib // Procedia CIRP – 2012. – Vol. 1. P. 319-324.
17. Chan, Noel Christopher. Analysis of spindle cooling system [Электронный ресурс]. – URL: [http://umpir.ump.edu.my/id/eprint/8577/1/CD8026\\_@\\_80.pdf](http://umpir.ump.edu.my/id/eprint/8577/1/CD8026_@_80.pdf) (дата обращения: 06.05.2019).
18. Орнис, Н.М. Основы механической обработки металлов: учебное пособие / Н.М. Орнис – Издательство «Машиностроение», М., 1968. 230 с.
19. Особенности эксплуатации шпинделей с воздушным и жидкостным охлаждением. [Электронный ресурс]. – URL: <http://moscowshpindel.ru/stati/osobennosti-ekspluatacii-shpindelej-s-vozdushnym-i-zhidkostnym-oxlazhdeniem/> (дата обращения: 10.05.2019).
20. Отличия шпинделя с воздушным охлаждением от жидкостного охлаждения. [Электронный ресурс]. – URL: <http://moscowshpindel.ru/stati/>

otlichiya-shpindelya-s-vozdushnym-oxlazhdeniem-ot-zhidkostnogo-oxlazhdeniya/  
(дата обращения 10.05.2019).

21. Dr. Sinan, Badrawy. Dynamic modeling and analysis of motorized milling spindles for optimizing the spindle cutting performance. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.nanotechsys.com/images/PDFs/DynamicModelingandAnalysis>. PDF (дата обращения: 20.05.2019).

22. Горина, Л.Н. Методические указания к дипломному проектированию / Л.Н. Горина. – Тольятти: ТГУ, 2003. – 17с.

23. Горина, Л.Н. Обеспечение безопасных условий труда на производстве: учебное пособие / Л.Н. Горина. – Тольятти: ТГУ, 2016. – 68 с.

24. Зубкова, Н.В. Учебное пособие по выполнению экономического раздела выпускной квалификационной работы для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.05 «Конструкторско – технологическое обеспечение машиностроительных производств»: учебное пособие / Н.В. Зубкова. – Тольятти: ТГУ, 2015. – 73с.