

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

**Розрахунок та конструювання шпindelної бабки
фрезерно-свердлильно-розточного верстата з ЧПК**

Виконав: студент

IV курсу, групи МВ-41

спеціальності

133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва спеціальності)

Владислав ТРОФИМЧУК

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Володимир КРУПА

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Володимир КОБЕЛЬНИК

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Володимир КРУПА

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)
Кафедра конструювання верстатів, інструментів та машин
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Володимир КРУПА

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

20__ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва спеціальності)
студенту Трофимчуку Владиславу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розрахунок та конструювання шпindelної бабки фрезерно-свердлильно-розточного верстата з ЧПК

Керівник роботи Крупа Володимир Васильович, канд. техн. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «29» січня 2024 року № 4/7-76

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи Базова модель фрезерно-свердлильно-розточного верстат з ЧПК, Базовий технологічний процес деталі типу корпус для обробки на даній моделі верстата.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ. 2. Технологічний розділ. 3. Конструкторський розділ. 4. Безпека життєдіяльності та основи охорони праці. Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Шпindelна бабка: складальне креслення – 2-3 ф. А1. 2. Креслення деталі – 1 ф А2

3. Креслення деталей шпindelної бабки – 1 ф. А1; 4. Плакатні листи – 2 ф А1

АНОТАЦІЯ

Трофимчук В.О. Кваліфікаційна робота бакалавра на тему «Розрахунок та конструювання шпиндельної бабки фрезерно-свердлильно-розточного верстата з ЧПК»

У роботі проаналізовано як базову модель так і існуючі моделі верстатів аналогічного призначення. Вибрано типову деталь для обробки на даному верстааті та проведено конструкторський контроль креслення та аналіз її на технологічність. Розроблено удосконалений технологічний процес виготовлення даної деталі та здійснено його аналіз. Проведено розрахунок граничних режимів обробки для проєктованого обладнання на базі обробки поверхонь даної деталі. Проведено кінематичний та силовий розрахунок приводу головного руху, основні компоненти якого розміщені у шпиндельній бабці. Здійснено розрахунок шпиндельного вузла.

Ключові слова: точність, поверхня, жорсткість, шпиндельний вузол, податливість.

SUMMARY

Trofymchuk V.O. Bachelor's qualification work on the topic «Calculation and design of the spindle headstock for a CNC milling-drilling-turning machine»

The paper analyzes both the basic model and existing models of machines of similar purpose. A typical part was selected for the payment on this machine, and design control of the drawing and analysis of its manufacturability were carried out. An improved manufacturing process of this part was developed and its analysis was carried out. An analysis of the processing limit modes for the designed equipment was carried out based on the processing of the surfaces of this part. The kinematic and force calculation of the main motion drive, the main components of which are located in the spindle headstock, was carried out. The calculation of the spindle assembly has been carried out.

Key words: precision, surface, rigidity, spindle assembly, ductility.

ЗМІСТ

ВСТУП	
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	
1.1. Аналіз верстата-прототипа.....	
1.2. Огляд конструкцій фрезерно-свердлильно-розточувальних верстатів з ЧПУ	
1.3. Аналіз типових компонок шпиндельних вузлів фрезерно- свердлильно-розточувальних верстатів і приклади їх конструкції	
1.4. Аналіз публікацій з вибраної тематики дослідження.....	
1.5. Аналіз службового призначення деталі	
1.5.1. Конструкторський контроль креслення деталі.	
1.5.2. Аналіз технічних умов на виготовлення деталі	
1.6. Аналіз конструкції деталі на технологічність.....	
1.6.1. Якісна оцінка технологічності	
1.6.2. Кількісна оцінка технологічності	
1.7. Висновки по розділу. Постановка мети та задач дослідження.	
2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	
2.1. Аналіз базового технологічного процесу виготовлення деталей	
2.2. Розробка маршрутного технологічного процесу	
2.3. Розробка операційної технології	
2.4. Розрахунок припусків та проміжних розмірів.	
2.5. Розрахунок режимів різання для проектованого обладнання	
2.6. Висновки по розділу	
3. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	
3.1. Кінематичний розрахунок	
3.1.1 Вибір електродвигуна приводу	
3.1.2 Діапазон регулювання	

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ		
<i>Зм</i>	<i>Арк</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>	Грофимчук				<i>Літ</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	Крупа						
<i>Реценз.</i>					ЗМІСТ		
<i>Н. контр.</i>	Кобельник				<i>ТНТУ, ФМТ, МВ-41</i>		
<i>Зав. каф.</i>	Крупа						

3.2. Силові розрахунки	
3.2.1. Визначення модуля найбільш навантаженої пари.....	
3.2.2. Попередній розрахунок діаметрів валів.....	
3.3. Розрахунок шпинделя	
3.3.1. Вибір компоновочної схеми опор шпинделя та розрахунок проектних параметрів	
3.3.2 Розрахунок жорсткості опор	
3.3.2.1 Розрахунок жорсткості передніх опор кочення	
3.3.2.2 Жорсткість задньої опори	
3.3.3. Жорсткість шпиндельного вузла	
3.3.4. Розрахунок оптимальної міжопорної відстані	
3.3.5. Розрахунок точності опор кочення	
3.4. Опис конструкції проєктованого вузла.....	
3.5. Висновки по розділу	
4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ..	
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	
ДОДАТКИ.....	

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

ВСТУП

Розробка конструкцій компонентів металообробного обладнання є складним трудомістким і відповідальним процесом, без якого неможливий технічний прогрес. Очікувані процеси обробки включають фрезерування площин, свердління та зенкерування отворів інструментом різного діаметра.

На підставі розрахунків режимів різання, а також загальних рекомендацій щодо проектування верстатних вузлів та обладнання необхідно орати принципову кінематичну схему, пристрої для затискання заготовок, змащування бабки та перемикання швидкостей.

У процесі роботи над кваліфікаційною роботою значну увагу було приділено роботі з технічною літературою як загальномашинобудівної орієнтації, так і спеціальною, у тому числі й з національними стандартами.

Метою даної кваліфікаційна робота має на меті проектування шпindelної бабки фрезерно-свердлильно-розточувального верстата, який призначений для обробки чавунних корпусних деталей.

Основні завдання:

1. Провести аналіз існуючих верстатів фрезерно-свердлильно-розточної групи а також їх типових шпindelних вузлів;
2. Провести аналіз службового призначення, конструкторський контроль креслення деталі-представника, а також аналіз деталі на технологічність;
3. Розробити удосконалений технологічний маршрут та операційну технологію обробки деталі;
4. Провести необхідний розрахунок граничних режимів різання для проектованого обладнання;
5. Провести кінематичний розрахунок приводу головного руху;
6. Провести силовий розрахунок елементів шпindelної бабки;
7. Провести конструювання шпindelної бабки верстата та розробити її складальне креслення

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ			
<i>Зм</i>	<i>Арк</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ВСТУП	<i>Літ</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>	Грофимчук							
<i>Перевір.</i>	Крупа							
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. контр.</i>	Кобельник							
<i>Зав. каф.</i>	Крупа							
						ТНТУ, ФМТ, МВ-41		

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Аналіз верстата-прототипа

Верстат свердлильно-фрезерно-розточувальної 2С150ПМФ4 з хрестовим не поворотним столом вертикальний з числовим програмним управлінням (ЧПУ) та пристроєм автоматичної зміни інструменту (АСІ) моделі 2С150ПМФ4 призначений для комплексної обробки плоских деталей середніх розмірів складної форми [1].

Верстат 2С150ПМФ4 призначений для багатоопераційної обробки різноманітних деталей складної конфігурації із сталі, чавуну, кольорових та легких сплавів з одної установки.

На верстаті 2С150ПМФ4 можна проводити напівчистове та чистове фрезерування площин, пазів та криволінійних поверхонь різними типами фрез, а також розточування, свердління, зенкерування, розвертання отворів та нарізання різей мітчиками та різцями за заданою програмою.

Верстат 2С150ПМФ4 може бути використаний у дрібносерійному та серійному виробництвах різних галузей промисловості.

Таблиця 1.1. Технічні характеристики верстата [1]

Найменування параметру1	
Клас точності згідно з ГОСТ 8-82	П
Межі діаметрів свердління, мм	5..50
Найбільший умовний діаметр свердління сталі 45, мм	40
Відстань від осі шпинделя до стійки (виліт), мм	550
Відстань від торця шпинделя до поверхні столу, мм	200..950

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ			
<i>Зм</i>	<i>Арк</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Аналітичний розділ	<i>Літ</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>	Грофимчук							
<i>Перевір.</i>	Крупа							
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. контр.</i>	Кобельник							
<i>Зав. каф.</i>	Крупа					<i>ТНТУ, ФМТ, МВ-41</i>		

Продовження таблиці 1.1.

Найбільші розміри заготовки, що встановлюється (довжина x ширина x висота), мм	800 x 500 x 620
Найбільший діаметр розточування, мм	160
Межі діаметрів різьби, що нарізається, мм	M6..M36
Найбільший діаметр торцевої фрези, мм	100
Розміри робочої поверхні столу, мм	500 x 1000
Число Т-подібних пазів	Розміри Т-подібних пазів
5	
Найбільше поздовжнє переміщення столу (X), мм	800
Найбільше поперечне переміщення столу (Y), мм	500
Найбільше вертикальне переміщення шпиндельної головки (Z), мм	750
Межа робочих подач столу та повзуна, мм/хв	1..5000
Швидкість швидкого переміщення координатами X, Y, Z, м/хв.	12
Допустиме зусилля подачі по координаті X, Y, кН	6
Допустиме зусилля подачі по координаті Z, кН	15/20 (11/15 кВт)
Точність позиціонування за координатою X, Y, мм	30
Точність позиціонування за координатою Z, мм	50
Шпиндель	
Частота обертання шпинделя, об/хв	28..3500
Кількість швидкостей шпинделя	Б/с
Найбільший крутний момент на шпинделі при 11 кВт, Нм	200 (реж. S1) 280 (реж. S2)

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

1.2. Огляд конструкцій фрезерно-свердлильно-розточувальних верстатів з ЧПУ

Фрезерно-свердлильно-розточувальні верстати [2-5] дозволяють крім операцій фрезерування здійснювати також свердління, зенкерування і розточування отворів, тобто такий верстат замінює кілька стандартних верстатів. Використання системи ЧПК сприяє підвищенню якості виробів, оскільки результат обробки залежить від професійних навичок робітника, а задається програмою.

Фрезерно-свердлильно-розточувальні верстати створюються на базі фрезерних, можливості яких розширюють застосуванням різного інструменту – свердла, борштанги, зенкери – та пристроїв

Тому огляд конструкцій таких можна звести до огляду конструкцій звичайних фрезерних верстатів.

Фрезерні верстати, що становлять понад 20% всього верстатного обладнання, призначені для виконання широкого спектру фрезерних операцій: фрезерування поверхонь, пазів, уступів, профільних криволінійних поверхонь. Головним рухом чи рухом різання є обертання фрези. Рух подачі здійснюється, як правило, столом із заготовкою або інструментом.

За розташуванням шпиндельної бабки виділяють горизонтально-і вертикально-фрезерні верстати.

Як видно з наведеної вище класифікації, фрезерні верстати діляться також за специфікою оброблюваних деталей.

Однак для всіх верстатів можна виділити загальні конструктивні особливості:

- станина
- Вертикальна станина з коробкою передач
- консоль із коробкою подач
- хобот

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

- підвіска
- кронштейн

Деякі з перерахованих елементів можуть бути відсутні в різних моделях верстатів.

Для збільшення продуктивності та точності (оскільки обробка йде з одного установа) використовуються багатошпиндельні фрезерні верстати.

1.3. Аналіз типових компонок шпиндельних вузлів фрезерно-свердлильно-розточувальних верстатів і приклади їх конструкції

Шпиндельні вузли виконують різних компонок [6-9] з кульковими та роликовими радіальними радіально-упорними та іншими видами підшипників [10-14]. Шпиндельні вузли з дворядним роликовим підшипником типу 3182100К і радіальним кульковим підшипником типу 178800 (рис. 2,а) застосовують у середніх та важких токарних, фрезерних, фрезерно-розточувальних та шліфувальних верстатах. У передній опорі перший підшипник призначений для сприйняття радіального навантаження, другий – для осьової. Діаметр шпинделя у передній опорі $d = 60...200$ мм.

Шпиндельні вузли з дворядним роликовим конічним підшипником типу 697000 в передній опорі і однорядним роликовим конічним підшипником з широким зовнішнім кільцем типу 17000 в задній (рис. 2,б) призначені для середніх і важких токарних і фрезерних верстатів. Передня опора має високу жорсткість, попередній натяг у ній створюють за допомогою кільця проставки, в задній - пружинами.

Шпиндельні вузли з однорядним конічним підшипником типу 67700 в передній опорі і однорядним роликовим конічним підшипником з широким зовнішнім кільцем типу 17000 в задній (рис. 2, в) застосовують у невеликих і середніх токарних і фрезерних верстатах, що виготовляються. Діаметр шпинделя у передній опорі - 40...160 мм. Найбільша частота обертання вище,

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

передбачають радіальний проміжок між зовнішніми кільцями підшипників і корпусом шпиндельної бабки.

Шпиндельні вузли з радіально-упорними шарикопідшипниками типу 46000К у передній опорі та дворядним роликовим підшипником типу 3182100К у задній (рис. 2, д) застосовують у легких токарних автоматах, алмазно-розточувальних та швидкісних фрезерних верстатах, а також у верстатах. Діаметр шпинделя в передній опорі - 20...80 мм. Частота обертання шпинделя досить висока: характеристика швидкохідності $(7...11) \cdot 10^5 \text{ мм} \cdot \text{хв}^{-1}$. Якщо необхідно підвищити осьову жорсткість, можна встановити радіально-упорні підшипники з великим кутом контакту. Радіальний зазор між зовнішнім кільцем підшипника задньої опори та корпусом не потрібний.

Шпиндельні вузли з радіально-упорними шарикопідшипниками типів 46000К 2 або 36000К 2 і 36000К (рис. 2, а) застосовують у середніх і важких круглошліфувальних і плоскошліфувальних верстатах. Діаметр передньої шийки шпинделя - 60...140 мм. Значення характеристики швидкохідності можуть змінюватися в залежності від властивостей мастильного матеріалу, особливостей мастил.

1.4. Аналіз публікацій з вибраної тематики дослідження

Розробці та обґрунтуванню конструкцій шпиндельних бабок фрезерних верстатів присвячена значна кількість як наукових так і інших праць.

Як правила в такій тематиці досліджень роботи розпочинають із загальних принципів [15] та прогнозування розвитку технічних систем [16] розробки приводу та підбору електродвигуна [17]. При моделюванні технічних характеристик верстатів застосовують статистичні методи розрахунку як конструктивних особливостей так і режимів різання [18-22].

Велика кількість наукових статей спрямована на розв'язання проблеми підвищення продуктивності та ефективності оброблення. Наприклад у праці

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

[23] подано підвищення ефективності процесу торцевого фрезерування шляхом розроблення конструкції торцевих фрез, у [24-28] аналогічний принцип застосовано для процесу розточування, у [29-32] – свердління.

Розробленню компоувальних схем нових типів верстатів та їх обґрунтуванню подано у роботах [33-35]. Перспективним є напрям щодо застосування можливостей систем автоматизованого конструювання при розробленні тих чи інших вузлів металорізальних верстатів [36-43]

1.5. Аналіз службового призначення деталі

Корпус насоса є відповідальною деталлю дизеля СЧН21/21 і входить у складальну одиницю насосів. В отвір Ø20H7 встановлюється шийка валика веденого зубчастого колеса, в розточку Ø52H7 встановлюються самі зубчасті колеса. В отвір Ø40H7 встановлюються два радіальні кулькові підшипники, на яких обертається шийка вал-шестірні. У цей же отвір між підшипниками встановлюється ущільнювальний вузол, що складається з кілець ущільнювачів і манжет, на площину роз'єму через прокладку встановлюється кришка, яка закріплюється до корпусу за допомогою восьми шпильок М8. З іншого боку встановлюється шайба, яка оберігає підшипниковий та ущільнювальний вузол від осьового зміщення та закріплюється до корпусу трьома болтами М6. Корпус встановлюється на передню кришку блок-картера, закріплюється до неї шістьма шпильками М10 і фіксується у визначеному положенні двома циліндричними штифтами Ø8 мм. Різьбові отвори М24x2 служать для підведення та відведення палива.

1.5.1. Конструкторський контроль креслення деталі.

Конструкторський контроль креслення проводиться, виходячи з вимог ЄСКД та ДСТУ на розробку та оформлення конструкторської документації [44].

Для деталі Корпус насоса.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

1. Допуск радіального биття поверхні $\varnothing 52H7$ щодо осі отвору $\varnothing 40H7$ не більше 0,03 мм. Невиконання цієї вимоги веде до передчасного зношування. Допуск торцевого биття щодо осі отвору $\varnothing 40H7$ не більше 0,03 мм на базовому діаметрі $\varnothing 50$. Допуск радіального биття поверхні $\varnothing 20H7$ щодо осі отвору $\varnothing 52H7$ не більше 0,03. Невиконання цих вимог веде до передчасного зносу деталей, що труться у вузлі.

2. Допуск непаралельності поверхні $\varnothing 52H7$ щодо осі отвору $\varnothing 40H7$ не більше 0,02 мм. Допуск непаралельності торцевої поверхні щодо дна отвору $\varnothing 20H7$ не більше 0,025 мм на базовій довжині 100 мм. Невиконання цих вимог веде до неправильного функціонування вузла загалом.

3. Допуск неплщинності торцевої поверхні не більше 0,02 мм. Невиконання цієї вимоги веде до нещільності прилягання торцевих поверхонь.

1.5.2. Аналіз технічних умов на виготовлення деталі

Технічний контроль креслень проводиться, виходячи з вимог ЄСКД та ДСТУ на розробку та оформлення конструкторської документації. Технічні вимоги вказані над штампом.

Для деталі Корпус насоса:

1. *Розміри довідок. Ця вимога показує, що розміри позначені зірочкою є довідковими. Довідковими називають розміри, що не підлягають виконанню за даним кресленням і вказуються для більшої зручності користування кресленням.

2. Ненаведені граничні відхилення розмірів $H14$, $h14$, $\pm IT14/2$; кутів – $\pm AT16/2$. Вимога показує граничні відхилення на кресленні, які не мають допуски. Верхнє та нижнє відхилення розмірів знаходять за таблицею.

3. Маркувати позначенням деталі. Дана технічна вимога показує, що після всієї механічної обробки, після контролю виріб необхідно промаркувати гравером позначення деталі шрифтом за висотою 5мм [44]. Цю вимогу необхідно виконати, щоб під час збирання не виникало плутанини з

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

установкою деталі, оскільки існує багато схожих виробів.

1.6. Аналіз конструкції деталі на технологічність

Технологічний аналіз конструкції забезпечує поліпшення техніко-економічних показників технологічного процесу, що розробляється. Тому технологічний аналіз одна із найважливіших етапів технологічної розробки, зокрема і курсового проектування [45].

Основні завдання, що вирішуються при аналізі технологічності конструкції оброблюваної деталі, зводяться до можливого зменшення трудомісткості та металомісткості, можливості обробки деталі високопродуктивними методами. Таким чином, покращення технологічності конструкції дозволяє знизити собівартість її виготовлення без шкоди для службового призначення.

Кожна деталь має виготовлятися з мінімальними трудовими та матеріальними витратами. Ці витрати можна значно скоротити правильним вибором варіанта технологічного процесу, його оснащення, механізації та автоматизації, застосування оптимальних режимів обробки. На трудомісткість виготовлення деталі мають особливий вплив її конструкція та технічні вимоги на виготовлення.

Оцінку технологічності проводять за кількісними та якісними показниками.

1.6.1. Якісна оцінка технологічності

Таблиця 1.2. Якісна оцінка технологічності

Вимоги технологічності	Технологічні характеристики
Деталь має виготовлятися із стандартних чи уніфікованих заготовок.	Технологічний

Властивості матеріалу деталі повинні задовольняти існуючі технології виготовлення, зберігання та транспортування.	Технологічний
Конструкція деталі має забезпечити можливість застосування типових, групових чи стандартних технологічних процесів.	Технологічний
Конструкція деталі має забезпечувати можливість багатомісної обробки.	Технологічний
Можливість обробки максимальної кількості розмірів високопродуктивними методами та інструментами.	Технологічний
Перепад розмірів має бути мінімальним.	Технологічний
Відсутність глибоких отворів малого діаметра.	Технологічний
Форма конструктивних елементів деталі (КЕД) – фасок, канавок тощо. Елементів має забезпечувати зручне підведення інструменту.	Нетехнологічні
Уніфікація КЕД для використання при обробці верстатів із програмним керуванням.	Технологічний

Висновок: дана деталь має конструкцію, яку слід визнати технологічною, оскільки задовольняє 89% вимог щодо відпрацювання конструкції на технологічність.

1.6.2. Кількісна оцінка технологічності

Характеризується розрахунком низки показників, що характеризують окремі властивості [45, 46]. Для оцінки технологічності конструкції можуть бути використані такі показники:

Коефіцієнти уніфікації.

- Для деталі Корпус насоса

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

$$K_y = \frac{n_y}{n_o} = \frac{24}{43} = 0,56 \cdot 100\% = 56\%$$

де n_y - кількість уніфікованих елементів деталі, шт.

n_o - загальна кількість конструктивних елементів деталі, шт.

Коефіцієнти точності обробки деталі:

- Для деталі корпус насоса визначаються із залежностей [47]

$$K_{TЧ} = 1 - \frac{1}{A_{CP}} \quad (1.1)$$

$$A_{CP} = \frac{\sum A \cdot n_i}{\sum n_i} \quad (1.2)$$

де A_{CP} - середній квалітет;

A - квалітет;

n_i - кількість розмірів відповідного квалітету.

$$A_{CP} = \frac{14 \cdot 23 + 12 \cdot 3 + 7 \cdot 5 + 6 \cdot 1}{23 + 3 + 11 + 5 + 1} = 11,3$$

$$A_{CP} \approx 11$$

$$K_{TЧ} = 1 - \frac{1}{11} = 0,91.$$

Коефіцієнти шорсткості визначаються із залежностей [47]:

$$K_{Ш} = \frac{1}{R_{CP}} \quad (1.3)$$

$$R_{CP} = \frac{\sum R \cdot n_{iШ}}{\sum n_{iШ}} \quad (1.4)$$

де R_{CP} - середній клас шорсткості

R - клас шорсткості ;

$n_{iШ}$ - число поверхонь відповідного класу шорсткості

$$R_{CP} = \frac{6 \cdot 3 + 5 \cdot 10 + 4 \cdot 23 + 3 \cdot 9}{3 + 10 + 23 + 9} = 3,96$$

$$R_{CP} \approx 4$$

$$K_{Ш} = 1 - \frac{1}{4} = 0,75.$$

Коефіцієнти використання матеріалу визначаються із залежності [47]:

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

$$K_M = \frac{M_D}{M_3} \quad (1.5)$$

Де M_D - маса деталі, кг,

M_3 - маса заготовки, кг.

Отримаємо

$$K_M = \frac{4,5}{6,6} = 68\%$$

1.7. Висновки по розділу. Постановка мети та задач дослідження.

За результатами розділу можна зробити наступні висновки:

1. Технічні характеристики верстата-прототипа в цілому забезпечують сучасні вимоги до процесу оброблення з точки зору точності та забезпечення діапазону подач. Потребує удосконалення привод головного руху і відповідно шпиндельна бабка

2. За результатами аналіз у шпиндельних вузлів верстатів аналогічного призначення рекомендовано для даних умов обробки шпиндельний вузол з радіально-упорними підшипниками. Кількість підшипників у передній опорі 2-3, у задній 1-2.

3. Аналіз деталі показує, що деталь технологічна за кількісними та якісними показниками. Кількісна оцінка технологічності показала, що складність виготовлення деталей середня, оскільки $K_T = 92\%$; коефіцієнт уніфікації входить у припустимі межі 0,4-0,6; при виборі способу виготовлення деталі 60-80 % - середній показник використання матеріалу. Деталь належать до технологічної.

Метою роботи є конструювання удосконаленої шпиндельною бабки фрезерно-свердлильно-розточного верстата з ЧПК з покращеними показниками швидкохідності іт підвищеними навантаженнями.

В роботі поставлено наступні основні завдання:

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

1. Розробити удосконалений технологічний маршрут та операційну технологію обробки деталі;
2. Провести необхідний розрахунок граничних режимів різання для проектованого обладнання;
3. Провести кінематичний розрахунок приводу головного руху;
4. Провести силовий розрахунок елементів шпиндельної бабки;
5. Провести конструювання шпиндельної бабки верстата;
6. Розробити робочі креслення деталей шпиндельної бабки.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1. Аналіз базового технологічного процесу виготовлення деталей.

Деталь за своїми конструкторськими особливостями відносяться до типу корпусних деталей. За аналог технологічного процесу приймається базовий технологічний процес корпусних деталей [47].

а) методом отримання заготовки є лиття у піщано-глинисті форми [46];

б) застосовуване обладнання відповідає вимогам технологічного процесу і дозволяє виконати всі технологічні вимоги креслення, обладнання всіх операціях з числовим програмним управлінням;

в) деякі операції виконуються із застосуванням універсальних та спеціальних пристроїв, вимірювальних інструментів;

г) дотримання технологічної дисципліни забезпечує якісне виготовлення деталей, в основному шлюб відбувається з технічних причин через грубі помилки виконавців.

На підставі вищесказаного можна зробити висновок, що існуючий на базовому заводі технологічний процес на сьогоднішній день деякою мірою застарів і вимагає змін та удосконалень при реорганізації самого процесу виробництва.

2.2. Розробка маршрутного технологічного процесу

Для розробки технологічного процесу обробки деталі потрібно попередньо вивчити її конструкцію та функції. Технологічний процес, що розробляється, повинен забезпечувати підвищення продуктивності праці та якості деталі, скорочення матеріальних і трудових витрат на його реалізацію, зменшення шкідливих впливів на навколишнє середовище.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ		
<i>Зм</i>	<i>Арк</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Технологічний розділ		
<i>Розроб.</i>	Грофимчук						
<i>Перевір.</i>	Крупа						
<i>Реценз.</i>							
<i>Н. контр.</i>	Кобельник						
<i>Зав. каф.</i>	Крупа				<i>Літ</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
					ТНТУ, ФМТ, МВ-41		

Технологічний маршрут обробки деталі подано в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 Технологічний маршрут обробки деталі «Корпус насоса»

Операції	Технологічні бази	Використовується обладнання
005 Заготівельна	-	-
010 Токарна (чорнова): -підрізання торців; -точити Ø 90g6 - центрувати торець; - свердлили отвір Ø 20; - Розточити Ø 39H7; Ø 40,5, Ø 34 та канавки.	Габарити деталі	Токарний верстат
015 Свердлильно-фрезерна-розточувальна: -Фрезерувати торці; -Фрезерувати контур деталі; - фрезерувати два відп. у розмір Ø51H9, -розточити у розмір 52H7; -Центрувати і свердлили відп. Ø 18, зенкерувати та розвернути у розмір Ø20H7 -Центрувати і свердлили два отв. Ø 30 -Центрувати торець під 8 отворів, свердлили 8 отв. нарізати в них різь М6 -свердлимо відп. Ø 3.	Ø 39H7 мм, габарити деталі	Свердлильно-фрезерно-розточувальний верстат з ЧПУ.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

020	Фрезерно-свердлильно-розточувальна: -Фрезерувати торці; -Фрезерувати контур деталі; -Розточити відп. у розмір Ø 40H7 -Центрувати торець під 11 отв, свердлити 4 отв. , Ø 15, свердлити і нарізати різь М6 в п'яти отв., свердлити два отв. Ø 8	Ø 52H7, торець деталі	Свердлильно-фрезерно-розточувальний верстат з ЧПУ.
025	Радіально-свердлильна: -Центруємо і свердлимо 3 отв. Ø 4	мм, Ø 52H7 мм, торець деталі	Токарний верстат
030	Слюсарна зачистити задирки	-	Верстат слюсарний
035	Мийна промити деталь	-	Ванна мийна
040	Контрольна остаточний контроль за кресленням	-	-
045	Маркувальна маркувати деталь	-	-

2.3. Розробка операційної технології

Операція 050 Заготівельна

Операція 010 Токарна (чорнова)

Обладнання: верстат токарно-гвинторізний 16К20

Пристрій: спеціальний, патрон 3-х кулачковий ГОСТ 2675-80

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Різальний інструмент: різець упорний прохідний ГОСТ 18870-73
різець прохідний відігнутий ГОСТ 18868-73
інструмент ріжучий ГОСТ 18062-72
різець канавковий ГОСТ 18884-73

Вимірювальний інструмент: штангенциркуль ШЦ-1-150 ГОСТ
166-89

калібр-пробка Ø 3971,
калібр-скоба 96gб.

Технологічна база – габарити Заготовки

Установ А

1. Точити Ø 90 gб з підрізанням торця попередньо;
2. Підрізати торець як чисто;
3. Центрувати торець.
4. Свердлити відп. Ø 20;
5. Розточити Ø 38,5 попередньо;
6. Розточити Ø 39Н7 остаточно;
7. Розточити канавку під кут 30 градусів на глибину 4 мм;
8. Розточити канавку b=3 мм до Ø 48Н9
9. Розточити Ø 34
10. Розточити канавку b=3 на глибину 40,5

Операція 015 Свердильно-фрезерна-розточувальна з ЧПК

Устаткування: верстат вертикально-фрезерний 2С150ПМФ4

Пристрій: спеціальний, стіл поворотний;

Різальний інструмент: кінцева фреза Ø 10 мм ГОСТ 17025-71;

фреза торцева Ø 100 мм ГОСТ 24359-80;

свердло Ø 9 ГОСТ 10903-77;

свердло Ø 6,8 ГОСТ 10903-77;

різець спеціальний;

Вимірювальний інструмент: штангенциркуль ШЦ-1-150 ГОСТ

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

166-89

Технологічна база -39Н7, торець.

Установ А

1. Фрезерувати торець, витримуючи розмір 87 мм;
2. Фрезерувати два отвори 30 на глибину 32,5 мм;
3. Фрезерувати два отвори Ø 51Н9 на глибину 30 мм;
4. Розточити два отвори розміром 52Н7;
5. Центрувати торець під 8 відп. Ø 6,8;
6. Свердлити 8 відп. Ø 6,8;
7. Нарізати різьблення М8 в 8 відп.
8. Фрезерувати поверхні по контуру розміром 135;
9. Центрувати поверхню під свердління відп. Ø 18;
10. Свердлити відп. Ø 19 на глибину 54,5;
12. Зенкерувати відп. у розмір АЕ19,8;
13. Розвернути відп. розмір 20Н7;

Операція 020 Свердильно-фрезерна-розточувальна з ЧПК

Устаткування: верстат вертикально-фрезерний 2С150ПМФ4

Пристрій: спеціальний, стіл поворотний;

Різальний інструмент: кінцева фреза Ø 10 мм ГОСТ 17025-71;

фреза торцева Ø 100 мм ГОСТ 24359-80;

свердло Ø 9 ГОСТ 10903-77;

свердло Ø 6,8 ГОСТ 10903-77;

Вимірювальний інструмент: штангенциркуль ШЦ-1-150 ГОСТ

166-89

Технологічна база - відп. Ø 52Н7, торець.

Установ А

1. Центрувати торець під свердління 11 отворів;
2. Свердлити 4 відп. Ø 15;
3. Свердлимо 5 отв. під різьблення М6;

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

4. Нарізаємо різьблення М6 в 5-ти відп.;

5. Свердлимо два відп. Ø 8;

Радіально-свердлильна:

-Центруємо і свердлимо 3 отв. Ø 4

-Центруємо, свердлимо і нарізаємо різьблення в 2 відп. М24х1, 5

Операція 025 Радіально-свердлильна

Обладнання: верстат радіально-свердлильний 2М55

Пристрій: спеціальний, стіл поворотний

Різальний інструмент: свердло спіральне Ø 4 ГОСТ 10903-77;

зенківка ГОСТ 15599-70; мітчик ГОСТ

3266-81

Вимірювальний інструмент: штангенциркуль ШЦ-1-150 ГОСТ

166-89

різбомір.

Технологічна база – зовнішній діаметр та торець черв'яка

Установ А

1. Центруємо поверхню під свердління 3 відп. Ø 4;

2. Свердлимо 3 відп. Ø 4;

Операція 030 Слюсарна

Обладнання: верстат слюсарний

Пристосування: лещата

Різальний інструмент: напильник.

1. Притупити гострі кромки

Операція 035 Мийна

Устаткування: ванна мийна

1. Промити деталь.

Операція 040 Контрольна

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Остаточний контроль за кресленням.

Операція 045 Маркувальна

1. Маркувати деталі.

2.4. Розрахунок припусків та проміжних розмірів.

У виробничих умовах розміри припусків встановлюють на підставі досвіду, використовуючи дані за масою та габаритами деталі, а також залежно від необхідного квалітету точності та необхідної шорсткості поверхні. Такий метод визначення припусків називають табличним на відміну від аналітичного, при якому загальна величина припуску визначається шляхом розрахунку його за складовими елементами з використанням різних коефіцієнтів.

Аналітичний спосіб розрахунку є точнішим, оскільки враховує конкретні умови виконання операцій технологічного процесу.

Розрахуємо припуски на обробку та проміжні граничні розміри для $\varnothing 90_{g6}$ мм.

1. Маршрут обробки:

Операція 010 Токарна

Перехід 1 - Чорне точіння

Перехід 2 - Чистове точіння

Для виконання розрахунків дані розташовуємо у вигляді таблиці, в якій вказують операції технологічного процесу і всі параметри поверхневого шару, що шукаються, як для заготовки, так і для поверхонь деталі по всіх операціях.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2. Розрахункова таблиця елементів припуску

Технологічна операція	Точність Заготовки та обробленої поверхні	Допуск на розмір d, мм	Елементи припуску, мкм				Проміжні розміри, мм		Проміжні припуски, мм	
			Rz	T	r	e	D _{макс}	D _{хв}	2Z _{макс}	2Z _{хв}
Заготовка	1 класу точності	±0,6	600	1200	-	96,68	95,06	-	-	
Токарна чорнова	h12	-0,400	50	50	480	600	91,58	91,16	5,1	3,9
Токарна чистова	g6	-0,012 -0,034	30	30	40	24	89 986	89,96 1	1,6	1,2

Де Rz - Параметр шорсткості;
 T – глибина дефектного шару;
 r – просторове відхилення;
 e – похибки установки.

2. Заготовка

Якість поверхні виливків 1 класу розміром до 1,2м Rz+T=600мкм; [46].

Допустимі відхилення за розмірами для даних габаритах виливки ±0,6 мм [46].

3. Механічна обробка

Точність та якість поверхні після механічної обробки.

Чорнове обточування-квалітет 12; Rz= 50 мкм; T = 50 мкм;

чистове обточування-квалітет 8; Rz = 30 мкм; T = 30 мкм; [49]

4. Мінімальні проміжні припуски

При чорновій токарній обробці припуски обчислюють за формулою [49],

$$2Z_{\min}=2\left(\left(R_z + T\right)_{i-1} + \sqrt{\rho_{\Sigma i-1}^2 + \varepsilon_i^2}\right) \quad (2.1)$$

Де R_{zi-1} - Висота нерівностей профілі на попередньому переході;
 T_{i-1} - Глибина дефектного поверхневого шару на попередньому переході;
 $\rho_{\Sigma i-1}$ -сумарні просторові відхилення на попередньому переході
 ε_i - похибка установки заготовки на переході.

Визначення величини $\rho_{\Sigma i-1}$ для заготовки [49]

$$\rho_{\Sigma i-1} = \sqrt{\rho_{\text{кор}}^2 + \rho_{\text{см}}^2} \quad (2.2)$$

Де $\rho_{\text{кор}}$ – похибка заготовки від короблення;

$\rho_{\text{см}}$ – похибка заготовки по зміщенню;

Похибка заготовки від короблення визначиться згідно [49]

$$\rho_{\text{кор}} = \Delta_k \cdot B \quad (2.3)$$

де $\Delta_k = 0,7 \div 1$ – кривизна заготовки, [49]

B – товщина оброблюваної заготовки.

Підставивши дані отримаємо:

$$\rho_{\text{кор}} = 1 \cdot 0,063 = 0,063 \text{ мм.}$$

$$\rho_{\text{см}} = \delta = 1,2 \text{ мм} \quad [49]$$

$$\text{В результаті } \rho_{\Sigma i-1} = \sqrt{1,2^2 + 0,063^2} = 1,2 \text{ мм.}$$

Похибку установки визначаємо за формулою [49]:

$$\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon_B^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_{\text{ПР}}^2} \quad (2.4)$$

де $\varepsilon_B = 0$ мкм, - похибка базування, [49],

$\varepsilon_3 = 0,6$ мкм, - похибка закріплення, [49],

$\varepsilon_{\text{ПР}} = 0,05$ мкм, - похибка положення заготовки, [49],

Підставивши будемо мати

$$\varepsilon_1 = \sqrt{0^2 + 0,6^2 + 0,05^2} = 600 \text{ мкм.}$$

$$\text{Сумарно } 2Z_{\min} = 2(600 + \sqrt{1200^2 + 600^2}) = 3883 \approx 3,9 \text{ мм}$$

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Обчислюємо припуски при чистовій токарній обробці. Остаточну суму похибок після чорнового точіння можна отримати з допомогою емпіричної формули [49]:

$$\rho_{\Sigma i-1} = k_y \cdot \rho_{\Sigma i} \quad (2.5)$$

де k_y – коефіцієнт уточнення форми $k_y = 0,04$ [49]

$$\rho_{\Sigma i-1} = 0,04 \cdot 1,2 = 0,48 \text{ мм}$$

$$\varepsilon_2 = 0,04 \cdot 0,6 = 0,024 \text{ мм}$$

Отримаємо:

$$2Z_{\min} = 2(50 + 50 + \sqrt{480^2 + 24^2}) = 1161 \text{ мкм} \approx 1,2 \text{ мм}$$

Визначаємо максимальні проміжні припуски за формулою [49]:

$$2Z_{\max} = 2Z_{\min} + \delta_i \quad (2.6)$$

для чорнкової токарної обробки:

$$2Z_{\max} = 3883 + 1200 = 5083 \text{ мкм} \approx 5,1 \text{ мм}$$

для чистової токарної обробки:

$$2Z_{\max} = 1161 + 400 = 1561 \text{ мкм} \approx 1,6 \text{ мм}$$

2. Проміжні міжопераційні розміри

Мінімальні і максимальні розміри отримують із залежностей:

$$D_{\min} = D_{\min} + 2Z_{\min} \quad (2.7)$$

$$D_{\max} = D_{\max} + 2Z_{\max} \quad (2.8)$$

Для чорнового точіння

$$D_{\min} = 89,961 + 1,2 = 91,161 \text{ мм}$$

$$D_{\max} = 89,986 + 1,6 = 91,586 \text{ мм}$$

Для заготовки

$$D_{\min} = 91,161 + 3,9 = 95,061 \text{ мм}$$

$$D_{\max} = 91,586 + 5,1 = 96,686 \text{ мм}$$

Виходячи з розрахунків, приймаємо діаметр заготовки 97 мм.

Припуски інші поверхні заготовки призначаємо по таблицям на виливок 1 класу точності по ДСТУ 8981:2020.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Таблиця 2.3. Припуски до деталі

Поверхні	Припуск	
	Розрахунковий, мм	Табличний, мм
Ø 90g6 мм	Ø 96±0,6	
Ø 40H7мм		Ø 37±0,4
Ø 52H7 мм		Ø 47±0,4
98H12 мм		104±0,6
87h12 мм		87±0,5

Заповнюємо відповідну технологічну документацію, з використанням [50]

2.5. Розрахунок режимів різання для проектного обладнання

Перелік передбачуваних операцій, що виконуються на верстаті:

- фрезерування чавунної заготовки торцевою фрезою Ø100 мм (чорнова обробка);
- фрезерування чавунної заготовки торцевою фрезою Ø100 мм (чистова обробка);
- фрезерування чавунної заготовки кінцевою фрезою Ø10 мм (чорнова обробка);
- фрезерування чавунної заготовки кінцевою фрезою Ø10 мм (чистова обробка);
- свердління в корпусі отворів Ø9 мм;
- свердління в корпусі отворів Ø6,8 мм.

При розрахунку режимів різання використаємо матеріали [51-53], а також деякі рекомендації [54-56]. При розрахунках застосуємо пакет MathCAD [57]

Розрахунок режимів різання при чорновій обробці чавунної деталі торцевою фрезою

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Вихідні дані для заданих умов наведені в таблиці

Таблиця 2.4. Вихідні дані для розрахунку режимів різання при чорновій обробці чавунної деталі торцевою фрезою

Параметр	Значення
Матеріал різального леза і кількість зубів, z	ВК6, z=10
Стійкість інструмента T, хв	180
Глибина різання t, мм	3
Подача на зуб S _z , мм/зуб	0,2

Швидкість різання визначаємо за формулою [51,52]:

$$v = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z^p} \cdot k_v \quad (2.9),$$

де

$$k_v = k_{m_v} \cdot k_{n_v} \cdot k_{u_v} \quad (2.10)$$

Підставивши елементи режиму різання будемо мати:

$$v = \frac{445 \cdot 100^{0,2}}{180^{0,32} \cdot 3^{0,15} \cdot 0,2^{0,35} \cdot 60^{0,2} \cdot 10^0} \cdot 0,744 = 99,5 \text{ м/хв}$$

Частота обертання шпинделя [51,52]:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} \quad (2.11)$$

$$n = \frac{1000 \cdot 99,5}{3,14 \cdot 100} = 316 \text{ об/хв}$$

Складова P_z сили різання [51,52]:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot k_{m_p} \quad (2.12)$$

$$P_z = \frac{10 \cdot 54,5 \cdot 3^{0,9} \cdot 0,2^{0,74} \cdot 100^1 \cdot 10}{100^1 \cdot 316^0} \cdot 1 = 5286,35 \text{ Н}$$

Потужність різання

$$N = \frac{P_z \cdot v}{1000 \cdot 60} \quad (2.13)$$

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

$$N = \frac{5286,35 \cdot 99,5}{1000 \cdot 60} = 8,3 \text{кВт}$$

Розрахунок режимів різання при чистовій обробці торцевою фрезою корпусу з чавуну

Таблиця 2.5. Дані для розрахунку режимів різання при чистовій обробці торцевою фрезою

Параметр	Значення
Матеріал різального леза і кількість зубів, z	ВК6, z=10
Стійкість інструмента T, хв	180
Глибина різання t, мм	1
Подача на зуб S_z , мм/зуб	0,1

Швидкість різання визначиться із залежності [51,52]

$$v = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z^p} \cdot k_v \quad (2.14)$$

де $k_v = k_{m_v} \cdot k_{n_v} \cdot k_{u_v}$

Отримаємо:

$$v = \frac{445 \cdot 100^{0,2}}{180^{0,32} \cdot 1^{0,15} \cdot 0,1^{0,35} \cdot 60^{0,2} \cdot 10^0} \cdot 0,744 = 150 \text{м/хв}$$

Частота обертання шпинделя

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D}$$

$$n = \frac{1000 \cdot 150}{3,14 \cdot 100} = 597 \text{об/хв}$$

Складова P_z сили різання [51,52]:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot k_{m_p} \quad (2.15)$$

Будемо мати

$$P_z = \frac{10 \cdot 54,5 \cdot 1^{0,9} \cdot 0,1^{0,74} \cdot 60^1 \cdot 10}{80^1 \cdot 597^0} \cdot 1 = 743 \text{Н}$$

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Потужність різання:

$$N = \frac{P_z \cdot v}{1000 \cdot 60} \quad (2.16)$$

$$N = \frac{743 \cdot 150}{1000 \cdot 60} = 1,85 \text{кВт}$$

Розрахунок режимів різання при обробленні чавунної деталі кінцевою фрезою Ø10

Таблиця 2.5. Дані для розрахунку режимів різання при чорновій обробці торцевою фрезою Ø10

Параметр	Значення
Матеріал різального леза і кількість зубів, z	P6M5, z=3
Стійкість інструмента T, хв	60
Глибина різання t, мм	2
Подача на зуб S _z , мм/зуб	0,1

Швидкість різання визначаємо за формулою (2.14). Отримаємо

$$v = \frac{72 \cdot 8^{0,7}}{60^{0,25} \cdot 2^{0,5} \cdot 0,1^{0,2} \cdot 8^{0,3} \cdot 3^{0,3}} \cdot 0,8 = 47 \text{м/хв}$$

Частота обертання шпинделя

$$n = \frac{1000 \cdot 47}{3,14 \cdot 10} = 1512 \text{об/мин}$$

Складову P_z сили різання визначимо із залежності (2.15). Отримаємо:

$$P_z = \frac{10 \cdot 82 \cdot 2^{0,75} \cdot 0,1^{0,6} \cdot 10^1 \cdot 3}{10^{0,86} \cdot 1512^0} \cdot 1 = 1590 \text{Н}$$

Потужність різання визначимо за формулою

$$N = \frac{1590 \cdot 47}{1000 \cdot 60} = 1,25 \text{кВт}$$

Розрахунок режимів різання при чистовому фрезеруванні кінцевою фрезою Ø10

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Таблиця 2.6. Дані для розрахунку режимів різання при чистовій обробці торцевою фрезою Ø10

Параметр	Значення
Матеріал різального леза і кількість зубів, z	ВК8, z=3
Стійкість інструмента T, хв	60
Глибина різання t, мм	0,5
Подача на зуб S _z , мм/зуб	0,05

Швидкість різання обчислимо за формулою (2.14)

$$v = \frac{72 \cdot 10^{0,7}}{60^{0,25} \cdot 0,5^{0,5} \cdot 0,05^{0,2} \cdot 10^{0,3} \cdot 3^{0,3}} \cdot 1 = 143,84 \text{ м/хв}$$

Частота обертання шпинделя

$$n = \frac{1000 \cdot 60}{3,14 \cdot 10} = 4581 \text{ об/хв}$$

Складову P_z сили різання отримаємо за формулою (2.15):

$$P_z = \frac{10 \cdot 82 \cdot 0,5^{0,75} \cdot 0,05^{0,6} \cdot 10^1 \cdot 3}{10^{0,86} \cdot 4381^0} \cdot 1 = 524 \text{ Н}$$

Потужність різання

$$N = \frac{524 \cdot 143,84}{1000 \cdot 60} = 1,25 \text{ кВт}$$

Розрахунок режимів різання при обробці отворів Ø9

Таблиця 2.7. Дані для розрахунку режимів різання при свердлінні отворів Ø9

Параметр	Значення
Матеріал різального леза	Р6М5
Стійкість інструмента T, хв	35
Глибина різання t, мм	5
Подача S, мм/об	0,3

Швидкість різання при свердлінні визначиться за формулою [51,52]:

$$v = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot S^y} \cdot k_v \quad (2.17)$$

де $k_v = k_{m_v} \cdot k_{n_v} \cdot k_{u_v}$

Підставивши у залежність (2.17) дані отримаємо:

$$v = \frac{14,7 \cdot 10^{0,25}}{35^{0,125} \cdot 0,3^{0,55}} \cdot 1 = 31,6 \text{ м/хв}$$

Частота обертання шпинделя:

$$n = \frac{1000 \cdot 31,6}{3,14 \cdot 9} = 1118,2 \text{ об/хв}$$

Момент $M_{кр}$ різання визначимо із залежностей [51,52]:

$$M_{кр} = 10 \cdot C_m \cdot D^q \cdot S^y \cdot k_p \quad (2.18)$$

$$M_{кр} = 10 \cdot 0,021 \cdot 10^2 \cdot 0,3^{0,8} \cdot 1 = 8 \text{ Нм}$$

Потужність різання [51,52]:

$$N = \frac{M_{кр} \cdot n}{9750} \quad (2.19)$$

$$N = \frac{8 \cdot 1035}{9750} = 0,85 \text{ кВт}$$

Розрахунок режимів різання при обробленні свердлом $\varnothing 6,8$

Таблиця 2.8. Дані для розрахунку режимів різання при свердлінні отворів $\varnothing 9$

Параметр	Значення
Матеріал різального леза	P6M5
Стійкість інструмента T, хв	60
Глибина різання t, мм	3,4
Подача S, мм/об	0,25

Швидкість різання

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

$$v = \frac{14,7 \cdot 6,8^{0,25}}{60^{0,125} \cdot 0,25^{0,55}} \cdot 1 = 28,9 \text{ м/хв}$$

Частота обертання шпинделя

$$n = \frac{1000 \cdot 28,9}{3,14 \cdot 6,8} = 1353,5 \text{ об/хв}$$

Момент $M_{кр}$ різання

$$M_{кр} = 10 \cdot 0,021 \cdot 6,8^2 \cdot 0,25^{0,8} \cdot 1 = 3,2 \text{ Нм}$$

Потужність різання

$$N = \frac{3,2 \cdot 1353}{9750} = 0,44 \text{ кВт}$$

Дані по потужності та частотах обертання шпинделя при різних операціях зведемо в таблицю:

Таблиця 2.9. Дані по потужності та частотах обертання шпинделя

	Потужність, кВт	Частота обертання шпинделя, об/хв
1	8,3	316
2	1,46	597
5	0,86	1512
6	0,58	4581
9	0,85	1035
10	2,09	460

2.6. Висновки по розділу

1. Розроблено маршрутну та операційну технології виготовлення деталі «Корпус насоса»

2. Для операції свердлильно-фрезерно-розточувальна проведено розрахунок граничних режимів різання для всіх операцій, які будуть використані при проектуванні шпиндельної бабки

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

3. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1. Кінематичний розрахунок

3.1.1 Вибір електродвигуна приводу

Відповідно до розрахунків 2 розділу максимальна необхідна потужність становить 8,3 кВт. Прийmemo як електродвигун приводу 4ПФ 132М ВБО4 [58].

Двигун постійного струму 4ПФ 132МВБО4 захищеного виконання з незалежною вентиляцією з тахогенератором та датчиками теплового захисту призначений для регульованих електроприводів різних механізмів, включаючи електроприводи металорізальних верстатів. Живлення електродвигунів може здійснюватися як від генераторів постійного струму, так і випрямляючих пристроїв.

Технічні характеристики електродвигуна 4ПФ 132МВБО4:

- Широкорегульований, з повністю шихтованим статором, невід'ємними полюсами, компенсаційною обмоткою, підвищеною точністю.
- Температура довкілля: 1°C–40°C
- Номінальний режим роботи: S1 (допускається робота в режимах S2 – S8)
- Ступінь захисту: IP 23S
- Клас нагрівостійкості F
- Спосіб охолодження IC06
- Висота над рівнем моря не більше 1000 м
- Механічні дії по групі M8

Електродвигун виготовляється із прибудованим тахогенератором ТП80-20-0,5 постійного струму та датчиками теплового захисту, з незалежною вентиляцією від прибудованого електроventильатора. Виготовляється із незалежним збудженням. Напряга збудження – 220 В.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ			
<i>Зм</i>	<i>Арк</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	Грофимчук				Конструкторський розділ	<i>Літ</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	Крупа							
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. контр.</i>	Кобельник					<i>ТНТУ, ФМТ, МВ-41</i>		
<i>Зав. каф.</i>	Крупа							

Ймовірність безвідмовної роботи за напрацювання 10000 год не менше 0,95 (із заміною щіток за потреби через 2000 год). Середній ресурс до списання 30 000 год. Середній термін служби 15 років.

Стійка робота двигуна постійного струму 4ПФ 132МВБО4 в перехідних режимах, що встановилися і забезпечується системою управління. Електродвигуни допускають перевантаження струмом:

1,6 I_n - протягом 1 хв при номінальній частоті обертання

2 I_n - протягом 15 с при номінальній частоті обертання

1,5 I_n - протягом 10 с при максимальній частоті обертання.

Максимальна частота обертання – 4500 об/хв

Мінімальна частота обертання – 200 об/хв

3.1.2 Діапазон регулювання

Відповідно до [59] діапазон регулювання приводу визначається із залежності:

$$R_n = \frac{n_{max}}{n_{min}} \quad (3.1)$$

Підставивши в залежність (3.1) дані необхідних частот обертання отримаємо

$$R_n = \frac{4500}{100} = 45$$

Виберемо знаменник геометричного ряду відповідно до рекомендацій [59]

$$\varphi = \sqrt[3]{2} = 1,26$$

Діапазон регулювання електродвигуна

$$R_e = \frac{n_{emax}}{n_{emin}}$$

$$R_e = \frac{4500}{200} = 22,5$$

Число ступенів механічного регулювання (зубчастих пар) визначиться за

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

формулою [59]:

$$z = \frac{\lg(R_n \cdot \varphi)}{\lg(R_e \cdot \varphi)} \quad (3.2)$$

Підставивши раніше отримані дані будемо мати:

$$z = \frac{\lg(45 \cdot 1,26)}{\lg(22,5 \cdot 1,26)} = 1,36$$

Приймаємо $z=2$.

У випадку ступеневого регулювання загальні кількість ступеней коробки становить [59]:

$$s = 1 + \frac{\lg R_n}{\lg \varphi} \quad (3.3)$$

Підставивши дані у 3.3.будемо мати

$$s = 1 + \frac{\lg 45}{\lg 1,26} = 17,47$$

Зважаючи, що вибраний двигун забезпечує певний діапазон частот обертання шпинделя приймемо безступеневе регулювання з однією переборною групою. Від двигуна приймемо зубчасту передачу, а далі одну переборну групу з двома парами зачеплення. Графік частот обертання показаний на рис. 3.1.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

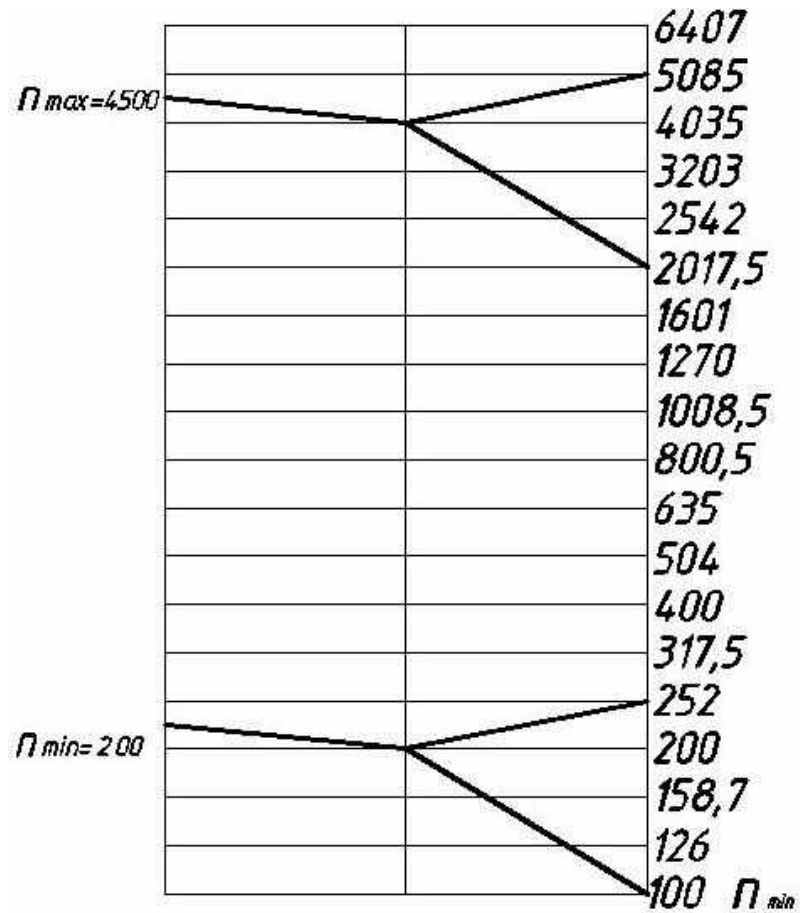


Рис. 3.1. Графік часто обертання шпинделя

Будуємо кінематичну схему

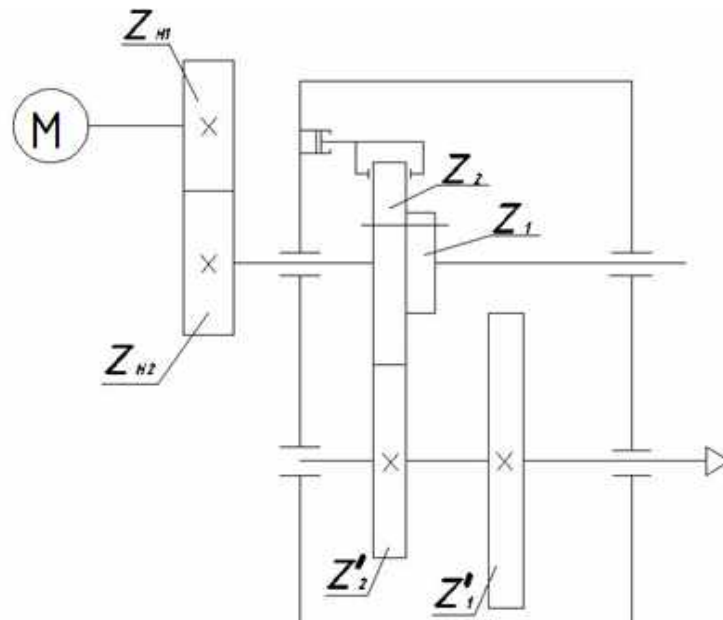


Рис. 3.2. Кінематична схема приводу

Визначимо кількість зубів зубчастих коліс, прийнявши для коліс однаковий модуль. При незмінній міжосьовій відстані та однаковому модулі зубчастих коліс сумарна кількість їх зубів повинна бути постійною:

$$z_j + z'_j = const$$

z_j – число зубів ведучого колеса,

z'_j – число зубів веденого колеса.

Передаточне відношення такої зубчастої пари визначиться із залежності

$$i_j = \frac{z_j}{z'_j} \quad (3.4)$$

Тоді

$$z_j = \frac{i_j \cdot \sum z}{i_j + 1} \quad (3.5)$$

$$z'_j = \frac{\sum z}{i_j + 1} \quad (3.6)$$

Для того, щоб колеса мали цілу кількість зубів, замінимо $\frac{z_j}{z'_j}$ на

$\frac{a_j}{b_j}$, де a_j і b'_j – взаємно прості чила.

Тоді залежності 3.5 та 3.6 набудуть вигляду

$$z_j = \frac{a_j \cdot \sum z}{a_j + b_j} \quad (3.7)$$

$$z'_j = \frac{b_j \cdot \sum z}{a_j + b_j} \quad (3.8)$$

Таблиця 3.1. Дані для розрахунків

$i_j = \frac{a_j}{b_j}$	$a_j + b_j$	НОК
$i_1 = \frac{1}{\varphi^3} = \frac{1}{1,26^3} = \frac{1}{2}$	$1+2=3$	9
$i_1 = \varphi = 1,26 = \frac{5}{4}$	$5+4=9$	

$$z_{1\min} = \frac{a_1 \cdot \sum z}{a_1 + b_1} = \frac{1}{1+2} \cdot 9 = 3$$

Така кількість зубів у колеса неприпустима, тому що рекомендується, що мінімальна кількість зубів колеса має бути не менше 20.

Для виконання цієї вимоги знайдемо додатковий множник

$$E = \frac{Z_{\text{рекоменд}}}{Z_{\min}}$$

$$E = \frac{22}{3} = 7 \frac{1}{3} \approx 8$$

Тоді

$$\sum Z = 9 \cdot 8 = 72,$$

$$z_1 = \frac{1}{1+2} \cdot 72 = 24 \quad z_2 = \frac{5}{5+4} \cdot 72 = 40$$

$$z'_1 = \frac{2}{1+2} \cdot 72 = 48 \quad z'_2 = \frac{4}{5+4} \cdot 72 = 32$$

З конструктивних міркувань прийнемо такі кількості зубів зубчастих коліс:

$$z_1 = 33$$

$$z_2 = 55$$

$$z'_1 = 66$$

$$z'_2 = 44$$

3.2. Силіві розрахунки

3.2.1. Визначення модуля найбільш навантаженої пари

Момент на колесі найбільш навантаженої пари визначається за формулою [60]:

$$M_{\text{кр}} = \frac{9550 \cdot N}{n} \quad (3.9)$$

У вказаній формулі n – усереднена частота обертання шпинделя .

$$n = n_{\min} \sqrt{R_n} \quad (3.10)$$

$$n = 100 \sqrt{45} = 670 \text{ об/хв}$$

Потужність на колесі знайдемо як потужність електродвигуна із втратами

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

на ККД передач та пар підшипників із залежності [61]:

$$N = N_d \cdot \eta \quad (3.11)$$

де η – коефіцієнт корисної дії, який визначиться як добуток ККД зубчастої передачі 0,96 та квадрата ККД підшипників (0,99). Отримаємо

$$\eta = 0,96 \cdot 0,99^2 = 0,94$$

$$N = 11 \cdot 0,94 = 10,35 \text{кВт}$$

Тоді отримаємо максимальний крутний момент

$$M_{кр} = \frac{9550 \cdot 10,35}{670} = 151 \text{Нм}$$

Використаємо формулу проектного розрахунку міжосьової відстані зубчастої пари [61]:

$$a_w = 43(u + 1) \sqrt[3]{\frac{TK_{HB}}{[\sigma_H]^2 u^2 \psi_{ba}}} \quad (3.12)$$

$$a_w = 43(2 + 1) \sqrt[3]{\frac{151,1 \cdot 10^3 \cdot 1,15}{400^2 \cdot 2^2 \cdot 0,2}} = 152,2 \text{мм}$$

По стандартному ряду прийmemo $a_w = 150 \text{мм}$.

Модуль зачеплення визначиться із залежності[61]:

$$m = \frac{2a_w}{\sum z} \quad (3.13)$$

$$m = \frac{2 \cdot 150}{99} = 3,03 \text{мм}$$

Приймаємо модуль зубчастих коліс $m=3 \text{ мм}$.

Обчислимо ділильні діаметри зубчастих коліс із залежності:

$$d_{z_i} = m \cdot z_i \quad (3.14)$$

$$d_{z1} = 3 \cdot 33 = 99 \text{мм}$$

$$d_{z2} = 3 \cdot 55 = 165 \text{мм}$$

$$d'_{z1} = 3 \cdot 66 = 198 \text{мм}$$

$$d'_{z2} = 3 \cdot 44 = 132 \text{мм}$$

Ступінь точності встановлюємо по максимальній окружній швидкості

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

шестерні пари із залежності [61]:

$$v_{\text{окр}} = \frac{\pi \cdot m \cdot z \cdot n}{60000} \quad (3.15)$$
$$v_{\text{окр}} = \frac{3,14 \cdot 3 \cdot 44 \cdot 4500}{60000} = 31 \text{ м/с}$$

Прийmemo 6 ступінь точності коліс.

3.2.2. Попередній розрахунок діаметрів валів

Діаметри валів визначаються із залежності [60, 61]

$$d = 110 \sqrt[4]{\frac{N}{n}} \quad (3.16)$$

Підставивши дані визначимо діаметр вхідного валу коробки

$$d = 110 \sqrt[4]{\frac{10,32}{670}} = 39,3 \text{ мм}$$

Прийmemo діаметр $d=40$ мм.

Діаметр шпинделя в передній опорі визначиться за формулою:

$$d \geq \frac{P}{0,1 \dots 0,2}$$
$$d \geq \frac{10,32}{0,1 \dots 0,2} = 103,2 \dots 55 \text{ мм}$$

Прийmemo $d_{\text{шп.пер.оп}} = 100 \text{ мм}$

3.3. Розрахунок шпинделя

3.3.1. Вибір компоновочної схеми опор шпинделя та розрахунок проєктних параметрів

Визначаємо параметри швидкості шпиндельного вузла:

$$d \cdot n_{\text{max}} = 100 \cdot 4500 = 4,5 \cdot 10^5$$

На основі отриманого результату вибираем компоновочну схему №5 [59]
(рис. 3.3.)

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

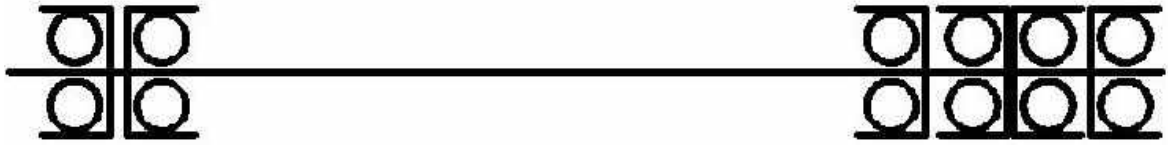


Рис. 3.3. Компонувальна схема шпиндельного вузла

Конструктивні параметри розраховуємо відповідно до рекомендацій [63]

Виліт переднього кінця шпинделя

$$a \approx d,$$

Прийmemo = 100мм

Довжина міжопорної частини шпинделя

$$l \approx (3 - 5)d,$$

Прийmemo = 400мм

Діаметр задньої опори

$$d_{\text{зад.опори}} \approx (1 - 0,8)d,$$

Прийmemo = 80мм

Характеристики обраних підшипників кочення подано в таблиці

Таблиця 3.2. Характеристики підшипників кочення опор

Параметр	Ліва опора	Права опора
№ підшипника	461164	46120У
Кут α , градус	25-30	25-30
Діаметр тіл кочення, мм	13,49	15,08
Кількість тіл кочення	20	22
d, мм	80	100
D, мм	125	150
B, мм	22	24
r, мм	2	2,5
Cдин, Н	43000	55000
Co, Н	40500	56000

3.3.2 Розрахунок жорсткості опор

3.3.2.1 Розрахунок жорсткості передніх опор кочення

Радіальна і осьова жорсткості опор кочення для вибраної компоувальної схеми визначаються за формулами, поданими в [63]

$$C_r = \frac{3,3 \cdot F_r'}{\delta_r' + \delta_r''} \quad (3.17)$$

$$C_a = 4,8 \cdot C^{\frac{2}{3}} \cdot A_0^{\frac{1}{3}} \quad (3.18)$$

де A_0 - переднатяг,

$$\delta_r'' = \frac{4 \cdot F_{r1} \cdot k_2'}{\pi \cdot d \cdot B} \left(1 + \frac{d}{D}\right) \quad (3.19)$$

де

$$F_{r1} = \frac{F_a(a+l)}{l} \quad (3.20)$$

$F_a = 7500$ Н – максимальна сила різання (по режимах різання),

$$F_{r1} = \frac{7500(90 + 400)}{400} = 9187 \text{ Н}$$

Так як в опорі є чотири підшипники, то сила

$$F'_{r1} = \frac{F_{r1}}{4}$$

$$F'_{r1} = \frac{9187}{4} = 2297 \text{ Н}$$

$$\text{Тоді } \delta_r'' = \frac{4 \cdot 2297 \cdot 0,0005}{3,14 \cdot 100 \cdot 24} \left(1 + \frac{100}{150}\right) = 0,001 \text{ мм}$$

$$\delta_r' = 0,03 \cdot D_m \cdot k_r \quad (3.21)$$

де

$$k_r = \frac{0,026}{(k_F + 0,02)^{0,6}} \left(\frac{F_r'}{C_0}\right) \quad (3.22)$$

де

$$k_F = 0,33 \cdot \left(\frac{A_0}{C_0}\right)^{0,64} = 0,33 \cdot \left(\frac{650}{56000}\right)^{0,64} = 0,019$$

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Тут переднатяг прийнятий відповідно до рекомендацій [59] $A=650$ Н.

Підставивши отримані дані в залежність (3.22) будемо мати:

$$k_r = \frac{0,026}{(0,019+0,02)^{0,6}} \left(\frac{2297}{56000} \right) = 0,0075$$

$$\text{Тоді } \delta_r' = 0,03 \cdot 15,08 \cdot 0,0075 = 0,0034 \text{ мм.}$$

$$\text{Відповідно, } C_r = \frac{3,3 \cdot 2297}{0,001+0,0034} = 1722750 \text{ Н/мм,}$$

Осьова жорсткість визначається за формулою [62]

$$C_a = 4,8 \cdot C^{\frac{2}{3}} \cdot A_0^{\frac{1}{3}} \quad (3.23)$$

де

$$C = 10^5 \cdot \sqrt{1,25 D_m} \cdot z \cdot (\sin 25^\circ)^{\frac{5}{2}} \quad (3.24)$$

Підставивши дані в залежності 3.34 та 3.26 будемо мати

$$C = 10^5 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 15,08} \cdot 22 \cdot (\sin 25^\circ)^{\frac{5}{2}} = 1109042$$

$$C_a = 4,8 \cdot 1109042^{\frac{2}{3}} \cdot 650^{\frac{1}{3}} = 440430 \text{ Н/мм.}$$

3.3.2.2 Жорсткість задньої опори

Жорсткість задніх опор кочення для вибраної компоувальної схеми і підшипників кочення визначається за формулою:

$$C_r = 1,66 \frac{F_r'}{\delta_r' + \delta_r''} \quad (3.25)$$

Осьова жорсткість рівна 0, оскільки задня опора прийнята плаваючою.

В формулі для радіальної жорсткості [63]

$$\delta_r'' = \frac{4 \cdot F_{r2} \cdot k_2'}{\pi \cdot d \cdot B} \left(1 + \frac{d}{D} \right) \quad (3.26)$$

де

$$F_{r2} = \frac{F a}{l} \quad (3.27)$$

$$F_{r2} = \frac{7500 \cdot 90}{400} = 1687,5 \text{ Н}$$

Сила реакції, що приходиться на один підшипник: $F'_{r2} = \frac{F_{r2}}{2}$

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

де l – відстань між опорами,

a - довжина переднього кінця шпинделя,

E – модуль зсуву,

I_1 і I_2 – осьові моменти інерції міжопорної частини і кінця.

Радіальне переміщення за рахунок податливості опор визначається за формулою:

$$y_{\text{оп}} = F \cdot \left[K_1 \left(\frac{a \cdot (1 - \varepsilon) + l}{l} \right)^2 + K_2 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right] \quad (3.32)$$

де K_1 і K_2 – податливість передньої і задньої опор.

Радіальне переміщення за рахунок зсуву шпинделя:

$$y_3 = \frac{F \cdot a}{G \cdot F_k} + \frac{F \cdot a^2 \cdot (1 - \varepsilon)}{G \cdot F_m \cdot l} \quad (3.33)$$

де F_k - площа перерізу переднього кінця шпинделя,

F_m - площа перерізу міжопорної частини шпинделя,

G – модуль зсуву.

Осьові моменти інерції:

Переднього кінця $I_1 = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_0}{d} \right)^4 \right] = \frac{\pi \cdot 100^4}{64} \cdot \left[1 - \left(\frac{45}{100} \right)^4 \right] = 4,7 \cdot 10^6 \text{ мм}^2.$

Міжопорної частини $I_2 = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_0}{d} \right)^4 \right] = \frac{\pi \cdot 97^4}{64} \cdot \left[1 - \left(\frac{55}{97} \right)^4 \right] = 3,89 \cdot 10^6 \text{ мм}^2.$

Тоді радіальна жорсткість шпиндельного вузла:

C

$$= \frac{1}{\frac{a^2}{3 \cdot E} \cdot \left[\frac{a}{I_2} + \frac{l(1 - \varepsilon)}{I_1} \right] + K_1 \cdot \left(\frac{a \cdot (1 - \varepsilon) + l}{l} \right)^2 + K_2 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \left(\frac{a}{l} \right)^2 + \frac{a}{G \cdot F_k} + \frac{a^2 \cdot (1 - \varepsilon)}{G \cdot F_m \cdot l}} \quad (3.34)$$

Підставивши вищезазначені значення будемо мати:

C

$$= \frac{1}{\frac{100^2}{3 \cdot 2 \cdot 10^5} \cdot \left[\frac{100}{3,89 \cdot 10^6} + \frac{400(1 - 0,2)}{4,7 \cdot 10^6} \right] + 0,58 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{100 \cdot (1 - 0,2) + 400}{400} \right)^2 + 1,427 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,2) \cdot \left(\frac{100}{400} \right)^2 + \frac{100}{0,8 \cdot 10^5 \cdot 6260} + \frac{100^2 \cdot (1 - 0,2)}{0,8 \cdot 10^5 \cdot 5011 \cdot 400}} = 368486 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

3.3.4. Розрахунок оптимальної міжопорної відстані

Запишемо рівняння податливості [63]:

$$K = \frac{a^2}{3 \cdot E} \cdot \left[\frac{a}{I_2} + \frac{l(1 - \varepsilon)}{I_1} \right] + K_1 \cdot \left(\frac{a \cdot (1 - \varepsilon) + l}{l} \right)^2 + K_2 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \left(\frac{a}{l} \right)^2 + \frac{a}{G \cdot F_k} + \frac{a^2 \cdot (1 - \varepsilon)}{G \cdot F_m \cdot l} \quad (3.35)$$

Для визначення оптимальної довжини необхідно знайти точку перегину рівняння податливості. Для цього рівняння податливості диференціюємо dl , прирівнюємо до нуля і вирішуємо щодо l . Отримаємо

$$l^3 - l \cdot \left(\frac{6EI_1K_1}{a} + \frac{3EI_1}{GF_m} \right) - 6EI_1 \cdot (K_1(1 - \varepsilon) + K_2) = 0 \quad (3.36)$$

Ввівши позначення отримаємо:

$$A = \frac{6EI_1K_1}{a} + \frac{3EI_1}{GF_m} \quad (3.37)$$

$$B = 6EI_1 \cdot (K_1(1 - \varepsilon) + K_2) \quad (3.38)$$

Вирішимо рівняння аналітичним методом, застосовуючи формулу:

$$l_{opt} = U + V,$$

де

$$U = \sqrt[3]{\frac{B}{2} + \sqrt{\frac{B^2}{4} - \frac{A^3}{27}}} \quad (3.39)$$

$$V = \sqrt[3]{\frac{B}{2} - \sqrt{\frac{B^2}{4} - \frac{A^3}{27}}} \quad (3.39)$$

Тоді оптимальна міжопорна відстань дорівнює:

$$A = \frac{6 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 4,7 \cdot 10^6 \cdot 5,8 \cdot 10^{-7}}{100} + \frac{3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 4,7 \cdot 10^6}{0,8 \cdot 10^5 \cdot 5011} = 0,397 \cdot 10^5$$

$$B = 6 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 4,7 \cdot 10^6 \cdot (5,8 \cdot 10^{-7} \cdot (1 - 0,2) + 1,427 \cdot 10^{-6}) = 1,06 \cdot 10^7,$$

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

$$U = \sqrt[3]{\frac{1,06 \cdot 10^7}{2} + \sqrt{\frac{(1,06 \cdot 10^7)^2}{4} - \frac{(0,397 \cdot 10^5)^3}{27}}} = 215,8$$

$$V = \sqrt[3]{\frac{1,06 \cdot 10^7}{2} - \sqrt{\frac{(1,06 \cdot 10^7)^2}{4} - \frac{(0,397 \cdot 10^5)^3}{27}}} = 58,5$$

$l_{\text{опт}} = 275 \text{ мм}$. Конструктивно приймемо $l_{\text{опт}} = 300 \text{ мм}$.

3.3.5. Розрахунок точності опор кочення

Розрахунок опор на точність зводиться до визначення величини та призначення відповідного класу точності підшипників. При цьому мають виконуватися такі умови:

$$2\Delta_{1э} < \frac{\Delta_{\text{дон}}\sqrt{m_1}}{3\left(\frac{a+l}{l}\right)}; \quad 2\Delta_{2э} < \frac{\Delta_{\text{дон}}\sqrt{m_2}}{3\left(\frac{a}{l}\right)},$$

де m_1 и m_2 – кількість підшипників у передній і задній опорах відповідно,

$\Delta_{\text{дон}}$ – допустиме радіальне биття центральної шийки.

Для верстат класу точності П $\Delta_{\text{дон}} = 7 \text{ мкм}$.

$$\text{Тоді } 2\Delta_{1э} < \frac{7\sqrt{4}}{3\left(\frac{100+400}{400}\right)} = 3,73 \text{ мкм}; \quad 2\Delta_{2э} < \frac{7\sqrt{2}}{3\left(\frac{100}{400}\right)} = 13,2 \text{ мкм}.$$

Згідно [59, 63] вибираємо клас точності підшипників із умови $\Delta_n \leq 2\Delta_i$.
Вибираємо для передньої опори підшипники класу точності 2, а для задньої – класу точності 4.

3.4. Опис конструкції проєктованого вузла

Шпинельна бабка верстата з ЧПУ складається з:

- корпусу
- шпинделя
- приводного валу

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

- гідроприводу для зміни швидкостей
- гідравлічного затискного механізму
- Системи підведення мастила.

Корпус відлитої із чавуну СЧ20. Для проведення монтажних та ремонтних робіт забезпечений знімною кришкою.

У корпусі на кулькових підшипниках серії 46100 встановлений шпиндель. Для захисту підшипників від зносу внаслідок влучення механічних домішок встановлено оптимальне ущільнення [59].

Перемикання передач здійснюється гідравлічним поршнем.

Привід здійснюється від електродвигуна 4ПФ 132М через зубчасту передачу.

3.5. Висновки по розділу

1. Здійснено кінематичний розрахунок безступеневого приводу головного руху з вибором електродвигуна постійного струму. Діапазон регулювання двигуна 22,5, приводу – 45. Кількість переборних груп – одна. Розроблено оптимальну кінематичну схему

2. На основі силових розрахунків прийнято розміри валів, а також модуль зубчастих коліс 3 мм.

3. На основі розрахунку шпинделя вибрано компоновальну схему, проведено розрахунок жорсткості опор, самого шпинделя та шпиндельного вузла. Жорсткість шпиндельного вузла становить $368486 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$, що є допустимим для даного виду обладнання

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1. Організація безпечної роботи експлуатації електроустановок

Робота щодо забезпечення безпечної експлуатації електроустановок здійснюється згідно з обов'язковими, для всіх споживачів електроенергії, незалежно від їх відомчої приналежності, правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів та правилами техніки безпеки і при експлуатації електроустановок споживачів. Обслуговування діючих електроустановок, проведення в них оперативних переключень, організація та виконання ремонтних, монтажних, налагоджувальних робіт і випробувань здійснюються спеціально підготовленим електротехнічним персоналом.

Роботи в діючих електроустановках з врахуванням заходів безпеки поділяються на виконувані: зі зняттям напруги, без зняття напруги на струмоведучих частинах і поблизу них, без зняття напруги на відстані від струмоведучих частин, котрі знаходяться під напругою. До робіт, виконуваних зі зняттям напруги, належать роботи, що виконуються в електроустановці, в котрій зі всіх струмоведучих частин знята напруга і вхід в приміщення сусідньої електроустановки, яка перебуває під напругою, закритий. До робіт, виконуваних без зняття напруги на струмоведучих частинах та поблизу них, належать роботи, котрі проводяться безпосередньо на цих частинах.

Роботою без зняття напруги на відстані від струмоведучих частин, що перебувають під напругою, вважається робота, при котрій виключається випадкове наближення працюючих людей та використовуваного ними ремонтного обладнання і інструменту до струмоведучих частин на відстань менше встановленої і не вимагається вжиття технічних або організаційних заходів (безперервного нагляду) такому наближенню.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ			
<i>Зм</i>	<i>Арк</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	Грофимчук				БЖД та основи охорони праці	<i>Літ</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Консульт</i>	Окіпний							
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. контр.</i>	Кобельник							
<i>Зав. каф.</i>	Крупа							
						<i>ТНТУ, ФМТ, МВ-41</i>		

При виконанні робіт зі зняттям напруги та без зняття напруги на струмоведучих частинах та поблизу них повинні виконуватись організаційні та технічні заходи.

До організаційних заходів належать:

оформлення роботи по наряд-допуску, розпорядженню або за переліком робіт, виконуваних в порядку поточної експлуатації;

допуск до роботи;

нагляд під час роботи;

переводи на інше робоче місце.

Наряд-допуск – це завдання на безпечне виконання роботи, оформлене на спеціальному бланку встановленої форми. Він визначає зміст, місце виконання роботи, час її початку та закінчення, умови її безпечного виконання, склад бригади та осіб, відповідальних за безпечне виконання роботи. Відповідальними за безпечне виконання робіт є: особа, що видала наряд; котра дає розпорядження; особа, що допускає до роботи; керівник роботи; виконавець роботи; спостережник; член бригади.

Усі роботи, котрі виконуються в електроустановках без наряду, виконуються:

за розпорядженням осіб, уповноважених на це, з оформленням в оперативному журналі;

в порядку поточної експлуатації з подальшим записом в оперативному журналі.

Розпорядження – це завдання на виконання роботи, що визначає її зміст, місце, час, заходи безпеки. Воно має разовий характер, видається на один вид роботи і діє протягом однієї зміни.

Поточна експлуатація – це проведення оперативним персоналом самостійно на закріпленій за ним ділянці протягом однієї зміни робіт за спеціальним переліком. До організаційних заходів у цьому випадку належить

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

складання, відповідальним за електрогосподарство, переліку робіт стосовно конкретних умов. До технічних заходів, що забезпечують безпеку робіт, виконуваних зі зняттям напруги, належать:

необхідні вимкнення та вжиття заходів, котрі запобігають подачі напруги до місця роботи внаслідок помилкового або довільного ввімкнення комутаційної апаратури;

вивішування на приводах ручного та на ключах дистанційного керування комунікаційної апаратури (автомати, рубильники, вимикачі) забороняючих плакатів;

перевірка відсутності напруги на струмоведучих частинах;

накладання заземлення;

вивішування попереджувальних та приписувальних плакатів, огороження, при необхідності, робочих місць та струмоведучих частин, які залишились під напругою.

4.2. Характеристика небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Технологічний процес з використанням верстата, здійснюється в умовах механічного цеху з залізобетонним підлогою. У цеху є водяне опалення, цехова магістраль стисненого повітря, освітлювальні та вентиляційні установки.

У процесі трудової діяльності оператор здійснює процес обробки деталі за допомогою ЧПК. При цьому він здійснює введення, налагодження та коригування програми, управляє електро-і гідроагрегатами, вмикає і вимикає верстат, здійснює контроль за ходом технологічної операції. Налагодження і переналагодження верстата здійснюється наладчиком.

В процесі експлуатації верстата на робочий діє ряд джерел небезпечних і шкідливих факторів. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори поділяються за своєю природою дії на групи:

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

1. Фізичні небезпечні і шкідливі виробничі фактори, такі як:

- рухомі частини верстата, що вилітає стружка і гострі кромки деталі;
- підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони;
- підвищена температура поверхні заготовки і інструмента;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень вібрації;
- небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі;
- недостатня освітленість робочої зони;

2. Хімічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори.

3. Біологічні небезпечні і шкідливі виробничі фактори.

4. Психофізіологічні небезпечні і шкідливі фактори:

- фізичні перевантаження (установка заготовок на верстат і зняття готових деталей з верстата);

- нервово-психічні перевантаження, викликані монотонністю праці;

Оцінка механічно небезпечних факторів.

До небезпечних механічних факторів належать рухомі елементи конструкції верстата [63] (різцетримач, піноль), супорт з встановленим в ньому різальним інструментом, що вилітають в процесі різання стружка і осколки ріжучогозального інструменту.

Основними небезпечними механічними факторами, що виникають в процесі токарної обробки деталі, є:

- стружка «сталевий в'юн», що має гострі краї і підвищену температуру;
- шпindel з патроном і закріпленої заготовкою;
- гострі кромки заготовки, лезо різця;
- рухомі елементи конструкції верстата, що вимагають огороження (шків і пасові передачі, ходовий гвинт і вал, що розподіляють рух в супорті);
- падаюча заготовка.

Для безпечної експлуатації верстата і захисту обслуговуючого персоналу передбачені захисні пристрої, призначені для огороження рухомих

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

механізмів, виключаючи можливість допуску до них. Зона різання має захисний пристрій, що включає в себе щиток з оглядовим вікном з міцного скла, що захищає людину від вильоту стружки бризок МОР і масел.

Вузли і механізми верстата, що представляють небезпеку, пофарбовані в різні кольори, регламентованими діючим законодавством.

Оцінка безпеки при виділеннях газів і парів.

Найбільш інтенсивними джерелами виділення шкідливих домішок є технологічні операції. Значення гранично допустимих концентрацій шкідливих домішок в повітрі робочої зони наводяться в ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [64]

Процес охолодження зони різання за допомогою подачі МОР є джерелом виділення в повітря аерозолів і парів води. МОР є також джерелом мікроорганізмів, що представляють біологічну небезпеку.

За технологічними і гігієнічними міркувань в якості МОР приймається емульсія «Аквол-2», що представляє собою 3% водний розчин емульсолів, що складається з мінерального масла ПАР, мила. Протизадирні і протизносні прокладки, що містять сірку і соду, фосфор і хлор, не використовуються, що ліквідує токсичність МОР.

Подача МОРС в зону різання здійснюється за допомогою сопла гідродинамічним способом. Така подача зменшує виділення аерозолів МОР. З практичних і довідковими даними інтенсивність виділення аерозолів емульсолів для даної групи і потужності верстатів не перевищує 100 мг / год. Таким чином, нормалізація повітря робочої зони може забезпечуватися загальнообмінною вентиляцією.

Процес обробки металу пов'язаний з виділенням пилу. Нетоксична пил зазвичай надає подразнюючу дію на слизові оболонки людини, а при попаданні в легені-специфічні захворювання. Для усунення цього небезпечного фактора використовується витяжна вентиляція.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз існуючих верстатів фрезерно-свердлильно-розточної групи а також їх типових шпиндельних вузлів. На основі аналізу вибрано напрям розробки

2. На основні проведеного аналізу службового призначення, конструкторський констроль креслення деталі-представника, а також аналіз деталі на технологічність встановлено, що деталь є технологічною, виявлено типи обладнання на якому вона може виготовлятися, а також поверхні з підвищеними вимогами до точності та шорсткості ,на які необхідно звернути увагу при проектуванні технологічного процесу

3. Розроблено удосконалений технологічний маршрут та операційну технологію обробки деталі;

4. Здійснено кінематичний розрахунок безступеневого приводу головного руху з вибором електродвигуна постійного струму. Діапазон регулювання двигуна 22,5, приводу – 45. Кількість переборних груп – одна. Розроблено оптимальну кінематичну схему

5. На основі силових розрахунків прийнято розміри валів, а також модуль зубчастих коліс 3 мм.

6. На основі розрахунку шпинделя вибрано компоувальну схему, проведено розрахунок жорсткості опор, самого шпинделя та шпиндельного вузла. Жорсткість шпиндельного вузла становить $368486 \frac{H}{mm}$, що є допустимим для даного виду обладнання

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ					
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ					
Розроб.	Грофимчук							Літ	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Крупа									
Реценз.										
Н. контр.	Кобельник							ТНТУ, ФМТ, МВ-41		
Зав. каф.	Крупа									

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Паспорт на верстат 2С150ПМФ4: керівництво, креслення, схеми, додатки. Київ, 68 с.
2. Бочков В.М., Сілін Р.І., Гаврильченко О.В. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів: підручник; за ред. Сіліна Р.І. Львів: Бескид Біт, 2008. 448 с.
3. Кузнєцов Ю. М., Саленко О. Ф., Харченко О. О., Щетинін В. Т. Технологічне обладнання з ЧПК: механізми і оснащення: навч. Посібник - Київ-Кременчук-Севастополь: Вид-во «Точка», 2014. — 500 с.:
4. Altintas Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design / Y Altintas. – 2012. – 382 p.
5. Технологія обробки на верстатах з ЧПК : навч. посіб. / Б. М. Гевко та ін. м. Тернопіль : Крок, 2014. 131 с.
6. Проектування обладнання галузевого машинобудування: Шпиндельні вузли на опорах кочення. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра, Київ: КПІм. Ігоря Сікорського, 2020. – 135 с.
7. Пат. UA 65488 МПК В23В 47/00, В23В 19/00, (2006.01) Шпиндельний вузол верстата / Кузнєцов Ю. М., Фіранський В.Б., Шинкаренко В.Ф., Гойдаєнко Ю.В.; заявник та патентовласник НТУУ «КПІ» – u 2012 11892. Заявл. 15.10.2012. Опубл. 25.04.2013, Бюл.№ 8
8. Пат. UA 69541А МПК В24В 41/00, (2006.01) Шпиндельний вузол / Крижанівський В.А., Пестунов В.М., Каприця О.С. заявник та патентовласник Кіровоградський ДТУ – u2003076800. Заявл. 18.07.2003. Опубл. 15.09.2004. бюл. № 9/2004.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ					
<i>Зм</i>	<i>Арк</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Перелік посилань					
<i>Розроб.</i>	Грофимчук							<i>Літ</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	Крупа									
<i>Реценз.</i>										
<i>Н. контр.</i>	Кобельник									
<i>Зав. каф.</i>	Крупа									
					<i>ТНТУ, ФМТ, МВ-41</i>					

9. Данильченко Ю.М., Петришин А.І. Динамічний аналіз механічної коливної системи «шпиндельний вузол-основа» // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ. - 2011. - №28. – С. 169-174.

10. High precision ball bearings. GMN Paul Müller Industries GmbH & Co. KG // www.gmn.de // 2010. – 98 p.

11. High speed spindles for manual tool change. GMN. Cat. 2508 0914 ENG // Оф. сайт фірми GMN. 2014. [Електронний ресурс]. URL: http://www.gmnusa.com/upload/news/2508_0914_e_2.pdf

12. Standart spindles: precision grinding spindles, cartridge spindles, precision boring heads. NSK. Cat. No. E2202a // Оф. сайт фірми NSK. 2012. [Електронний ресурс]. URL: http://www.nskamericas.com/cps/rde/xbcr/mx_es/Standard_spindle_catalogue_e2202a_120411.pdf

13. Данильченко Ю.М., Боронко О.О., Коломієць В.І. Визначення власних частот та форм коливань радіально-упорного кулькового підшипника // Вісник НТУУ «КПІ», сер. Машинобудування. – 2011. - №61. – Т.1. - С.87-90.

14. Верба І. І. Проектування обладнання галузевого машинобудування: Змащування та ущільнення підшипників кочення : Навчальний посібник / І. І. Верба, О. В. Даниленко. – Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2020. – 87 с.

15. Крупа В. В. Теорія технічних систем: особливості побудови, створення та розвитку /: навч. посіб. Тернопіль : ФОП Осадця, 2023. 308 с.

16. Кузнецов Ю. М., Скляр Р. А., Прогнозування розвитку технічних систем: навч. посібник / Ю. М. Кузнецов, Р. А. Скляр; під ред. Ю. М. Кузнецова. – К.: ТОВ «ЗМОК» – ПП «ГНОЗІС», 2004. – 323 с.

17. Скляр Р. А., Шанайда В. В., Савчук М. А. Дослідження перехідних процесів електропривода металорізального верстата з використанням інформаційних технологій / Р. Скляр, В. Шанайда, М. Савчук // Вісник НТУУ. — 2011. — Том 16. — № 1. — С.117-125.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

18. Скляр Р. А., Четвержук Т. І., Полінкевич Р. М., Редько Р. Г., Залета О. М. Статистичне моделювання технічних характеристик металорізальних верстатів. Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки», Випуск 71, Луцьк, 2021, № 71. – 363 с. – С. 322-329.

19. Improved Method for Determining the Feed Influence on the Tangential Cutting Force During Re-drilling, Countersinking and Boring Based on the Small Sample Theory / V. Krupa et al. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. 2024. URL: <https://doi.org/10.3311/ppme.29952> (date of access: 22.05.2024).

20. Вегера Н. О., Шанайда В. В. Комп'ютерне дослідження динамічних характеристик елементів модифікованого приводу головного руху вертикально-фрезерного верстата. *Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання* : Зб. тез Міжнар. студент. науково-техн. конф., м. Тернопіль, 26 квіт. 2018 р. Тернопіль, 2018. С. 178–179.

21 V. Krupa, N. Tymoshenko, V. Kobelnyk, I. Petrechko, Probability-statistical estimation method of feed influence on the tangential cutting force under turning, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 114/1 (2022) 22-31.

22. Кривий П.Д. Метод оцінювання статичної точності кінематичних ланцюгів подач консольних фрезерних верстатів / П. Д. Кривий, В. Р. Кобельник, В. В. Крупа, Н. М. Тимошенко // Прогресивні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць, Львів-Плай. – Львів, 2020. – С. 103–105.

23. Підвищення продуктивності процесу і якості плоскої поверхні сформованої комбінаційним торцевим фрезеруванням / П. Д. Кривий та ін. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. 2020. № 3 (47). С. 199--206.

24. Крупа В. В. Металорізальні інструменти з асиметричним розміщенням лез для оброблення глибоких отворів циліндрів : дис. ... канд.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

техн. наук : 05.03.01. Тернопіль, 2015. 168 с.

URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/5656>

25. Кривий П. Д., Крупа В. В. Інструментальне забезпечення процесу комбінованого розточування глибоких отворів тонкостінних циліндрів. Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. 2012. № 2. С. 23–34.

26. Кривий П., Крупа В., Продан В. Конструкторсько-технологічні передумови підвищення якості оброблення глибоких отворів тонкостінних циліндрів. Вісник ТДТУ. 2010. Т. 15, № 1. С. 147–156.

URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/486>.

27. Крупа В. В. Визначення конструкторсько-технологічних параметрів багаторізцевих розточних головок з поділом припуску та подачі. Вісник ТДТУ. 2011. Т. 16, № 1. С. 105–117.

URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/959>.

28. Substantiation of parameters for three-cutter boring head with allowance and feed distribution and asymmetric cutter position / Petro Kryvyi, Volodymyr Krupa, Volodymyr Kobelnyk, Yaroslav Kosiv. // Scientific Journal of TNTU. — Ternopil : TNTU, 2019. — Vol 96. — No 4. — P. 57–69.

29. Кобельник В.Р. Жорсткість вертикально-свердильних верстатів / В.Р. Кобельник, П.Д. Кривий // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – Вип. № 1 (40). – С. 34–40.

30. Кобельник В.Р. Методика дослідження кінематичної точності механізму подач вертикально-свердильних верстатів на прикладі верстата моделі 2Н118 / В.Р. Кобельник, П.Д. Кривий // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Житомир : ЖДТУ, 2010. – Вип. 8. – С. 99–108.

31. Кобельник В.Р. Підвищення ефективності процесу свердління наскрізних отворів регулюванням подачі: дис. канд. техн. наук: 05.03.01: / Кобельник Володимир Романович; Терноп. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. - Т., 2013. - 21 с.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

32. Кривий П.Д. Методи вимірювання головного заднього кута спірального свердла / П.Д. Кривий, В.Р. Кобельник, В.І. Продан, В.Г. Яковлев // Науковий вісник ХДМА : Науковий журнал. – Херсон : ХДМА, 2012. – № 2 (7). – С. 145–155.

33. Скляр Р. А., Шанайда В. В. Розробка критеріальних оцінок для аналізу компоновок верстатів з паралельною кінематикою. *Матеріали ІХ наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя*, м. Тернопіль, 18–19 трав. 2016 р. Тернопіль, 2016. С. 74.

34. Скляр Р. А., Шанайда В. В. Динамічна модель приводу автоматичної заміни інструментів багатоцільових верстатів. *Обладнання і технології сучасного машинобудування* : Матеріали Всеукр. науково-практ. конф., м. Тернопіль, 11 трав. 2017 р. Тернопіль, 2017. С. 155–156.

35 Крижанівський В. А., Кузнєцов Ю. М., Скляр Р. А. Сучасний стан, прогнозування і перспективи розвитку верстатів з паралельною кінематикою. // Наукові праці ЖДТУ.-Житомир, 2005.- №6, част.1. - С. 320-334.

36. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ. / Крижанівський В. А., Кузнєцов Ю. М., Валявський І. А., Скляр Р. А. – Кіровоград, 2004. – 449 с.

37. Nahalyuk A., Krupa V. Modeling of a lathe bed using the method of topological optimization. *Scientific Journal of TNTU. – Tern.: TNTU. 2023. Т. 111, № 3. С. 67–75. URL: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.03.*

38. Дослідження жорсткості системи затискний гвинтовий пристрій – деталь / О. П. Скиба та ін. Перспективні технології та прилади. 2014. № 5. С. 154–158.

39. Пік А. І., Фльонц І. В., Мельничук С. Л. Стенд для дослідження характеристик піднімально-транспортних лебідок. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. 2016. № 168. С. 92–96.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

40. Дослідження пружно-силових характеристик затискних цанг, виготовлених за діючими та новими технологіями / Р. Г. Редько та ін. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». 2014. № 44. С. 249–253.

41. Volodymyr Shanaida, Ruslan Skliarov, Valeriy Lazaryuk. Mathematical models for the analysis of the parameters of channels in the planning of mechanical processing and welding operations/ Proceedings ITTAP'2023: 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, November 22–24, 2023, Ternopil, Ukraine, Opole, Poland. 2023, 3628, pp. 43-54. (Scopus) <https://ceur-ws.org/Vol-3628/paper12.pdf>

42. Analysis of the stress-strain state of the vehicle frame by finite element method // Mykola Stashkiv, Ivan Pidgurskyi, Oleh Pidluzhnyi, Mykola Pidgurskyi, Mykhaylo Levkovych, Ruslan Skliarov, Andriy Mushak // Scientific Journal of TNTU. — Tern.: TNTU, 2022. — Vol 108. — No 4. — P. 89–102.

43. Ворощук В.Я., Вітенько Т.М. «Інжиніринг та 3D моделювання в середовищі SolidWorks». Навчальний посібник. 2023. – 164 с.

44. Ковбашин В. І., Пік А. І. Інженерна графіка : навч. посіб. м. Тернопіль : Підруч. і посіб., 2023. 240 с.

45. Васильків В.В., Радик Д.Л. Експериментальні дослідження у технології машинобудування: Навчальний посібник;. Тернопіль: ТНТУ, 2012. 256 с.

46. Васильків В. В. Технології виробництва заготовок литтям : навчальний посібник / В. В. Васильків, Л. М. Данильченко, Д. Л. Радик. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2023. – 492 с.

47. Технологічні основи машинобудування. [Електронний ресурс]: навчальний посібник / Ю.М. Малафеев; Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 201 с.

48. Міренський І.Г. Основи технології машинобудування: навчальний посібник. Харків: ХНАМГ, 2007. 275 с.

49. Мельничук П.П., Боровик А.І., Лінчевський П.А. Технологія

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

машинобудування: підручник. Житомир, ЖДТУ, 2005. 876 с.

50. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>

51. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, А.І.Грабченко, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов ; під заг. ред. М.П. Мазура. – 3-е вид. перероб. і доп. – Львів : Новий Світ-2000, 2020. – 471 с.

52. Грицай І. Є. Теорія різання. Лезове та абразивне оброблення металів: навчальний посібник. / І.Є. Грицай. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. 232 с.

53. Паливода Ю. Є. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки : навчально-методичний посібник / Паливода Ю.Є., Дячун А.Є., Лещук Р.Я. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 240 с.

54. Кобельник В.Р. Використання методу ітерацій для дослідження точності подач металорізальних верстатів/Кобельник В.Р, Крупа В.В., Тимошенко Н.М. // Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: тези допов. – Краматорськ: ДДМА, 2018. С. 78-80.

55. Вплив випадковості подачі на висоту мікронерівностей поверхні при її точінні або розточуванні / П. Кривий, Н. Тимошенко, М. Шарик, В. Крупа Львів : Машинознавство. 2013. №9-10 (195-196). С. 76-83.

56. Математична модель впливу стохастичності подачі на величину сили різання в імовірнісному аспекті / Володимир Крупа, Володимир Кобельник, Надія Тимошенко, Ігор Петречко // МММТЕС, 22-23 листопада 2022 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. — С. 41–42.

57. Шанайда В. В. Пакет MathCAD в інженерних розрахунках. Тернопіль : Вид-во ТДТУ, 2001. 163 с.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

58. Електродвигун 4ПФ 132МВБО4 URL:
<https://ventilator.ua/product/elektrodvigatel-4pf-132mvbo4-15-0-1030-5000/>

59. Бочков В.М., Сілін Р.І., Гаврильченко О.В. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів: підручник; за ред. Сіліна Р.І. Львів: Бескид Біт, 2008. 448 с.

60. Довбуш Т.А. Опір матеріалів: навч. посіб. до виконання розрахунково-графічних робіт і самостійної роботи /Довбуш Т.А., Хомик Н.І., Бабій А.В., Цьонь Г.Б., Довбуш А.Д. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2022. 220

61. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин:- Київ «Вища школа» 1993. – 560с.

62. Бабій А.В., Довбуш Т.А., Бабій М.В., Ткаченко О.І., Сташків М.Я. Динаміка машин. Навчальний посібник для студентів денної та заочної форм навчання спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування» та 208 «Агроінженерія» для здобуття освітнього ступеня «Магістр». Тернопіль : ТНТУ 2023. 246 с.

63. Статичний розрахунок шпindelьних вузлів на опорах кочення: Методичні вказівки до виконання розрахунків у дипломних проектах та курсових проектах. Частина 1 / Уклад.: І.І.Верба, О.В.Даниленко – К.: НТУУ „КПІ ім. Ігоря Сікорського“, 2017. – 104 с.

64. Вітенько Т.М. Корозія та антикорозійні покриття: навчальний посібник. Тернопіль: ТНТУ, 2011. – 59 с.

65. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях: Методичний посібник . Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. - 156 с.

					КРБ 20-039.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		