

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)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Конструювання компонентів приводу головного руху
свердлильного верстата для забезпечення технологічного
процесу виготовлення деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2»**

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи МВ-41

спеціальності 133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва спеціальності)

(підпис) **Василь ВАЛЬЧИШИН**
(прізвище та ініціали)

Керівник _____
(підпис) **Руслан СКЛЯРОВ**
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____
(підпис) **Володимир КОБЕЛЬНИК**
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____
(підпис) **Володимир КРУПА**
(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)

«__» _____ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня «бакалавр»
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Вальчишину Василю Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Конструювання компонентів приводу головного руху свердлильного верстата для забезпечення технологічного процесу виготовлення деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2»

Керівник роботи Склярів Руслан Анатолійович, к.т.н., доц. каф. ВІ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «21» 01 2026 року № 4/9-45

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20.06.2025

3. Вихідні дані до роботи Технічне креслення деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2», базовий технологічний процес обробки деталі, паспорти обладнання

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз завдання на проектування; огляд літератури по тематиці роботи; аналіз базового технологічного процесу механічної обробки деталі; технологічний розрахунок, розробка кінематичної схеми верстата на одну із технологічних операцій; розрахунок конструкції приводу головного руху свердлильного верстату; вирішення питань безпеки життєдіяльності та охорони праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Аналіз формуютьорюючих рухів – 1 ф.А1; Кінематична схема верстата – 1 ф.А1
Загальний вигляд верстату – 1 ф.А1; Привід головного руху – 2 ф.А1.

Анотація

Вальчишин Василь. Конструювання компонентів приводу головного руху свердлильного верстата для забезпечення технологічного процесу виготовлення деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2»: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 133 – галузеве машинобудування / наук. кер. Р. А. Склярів. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2026. 87 с.

Ключові слова: свердлильний верстат, картер коробки передач, механічна обробка, режими різання, привід головного руху.

В кваліфікаційній роботі приведені технологічні розрахунки та призначено режими для технологічних переходів на виготовлення деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2». Розроблено кінематичну схему верстата. Здійснено розробку конструкції приводу головного руху. Вирішені питання охорони праці та безпеки життєдіяльності.

Annotation

Valchyshyn Vasyi. Design of components of the main drive of a drilling machine to ensure the technological process for manufacturing the part «Gearbox housing 26.11-Zh2». Thesis for the bachelor's degree of specialty 133 - Industrial machinery engineering / Supervisor R. A. Skliarov. Ternopil : Ivan Puluji Ternopil National Technical University, 2026. 87 p.

Keywords: drilling machine, gearbox housing, machining, cutting modes, main drive.

In the bachelor's qualification work, technological calculations are presented and cutting modes are assigned for the technological transitions in manufacturing the part "Gearbox Housing 26.11-Zh2." A kinematic scheme of the machine has been developed. The design of the main drive has been carried out. Issues of occupational safety and life safety have been addressed.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Вальчишин В.</i>			<i>Лит.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Склярів Р.А.</i>				4	1
<i>Реценз.</i>					<i>Анотація</i> <i>ТНТУ ім. І. Пулюя</i> <i>зр. МВ-41, м.Тернопіль</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Кабельник В. Р.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Крцпа В.В.</i>					

Зміст

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Аналіз завдання	9
1.2 Характеристика об'єкту виробництва.....	17
1.3 Аналіз формоутворення оброблюваних поверхонь та вибір раціональних схем оброблення поверхонь	18
1.4 Огляд літератури	23
1.5 Висновки до 1 розділу	26
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	27
2.1 Особливості запропонованого ТП обробки деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2».....	27
2.2 Обґрунтування та вибір різального інструменту	29
2.3 Обґрунтування та призначення контрольних-вимірювальних інструментів.....	32
2.4 Верстатне забезпечення процесу обробки.....	34
2.5 Розрахунок режимів різання для технологічної операції	36
2.6 Висновки до 2 розділу	39
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	40
3.1 Розрахунок та обґрунтування параметрів приводу головного руху	40
3.1.1 Вибір та обґрунтування структурно-кінематичної схеми верстата	40
3.1.2 Загальна компоновка і принцип дії верстата.....	42
3.1.3 Розрахунок діапазону регулювання	44
3.1.4 Структурна формула та структурна сітка приводу головного руху	46
3.1.5 Побудова графіка чисел обертів	51
3.1.6 Енергетичний розрахунок та вибір електродвигуна	53
3.1.7 Побудова кінематичної схеми верстату.....	55
3.2 Розробка конструкції приводу та його розрахунок	57
3.2.1 Розрахунок крутних моментів на валах приводу.....	57

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>					
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>ЗМІСТ</i>					
<i>Розроб.</i>		<i>Вальчишин В.</i>						<i>Лит.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Склярів Р.А.</i>						5	2	
<i>Реценз.</i>								<i>ТНТУ ім. І. Пулюя зр. МВ-41, м.Тернопіль</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Кабельник В. Р.</i>								
<i>Затверд.</i>		<i>Крцпа В.В.</i>								

3.2.2	Визначення модуля зубчастих передач верстата	58
3.2.3	Геометричний розрахунок зубчастих коліс.....	61
3.2.4	Розрахунок діаметрів валів коробки швидкостей.....	63
3.2.5	Розрахунок та вибір підшипників	64
3.3	Опис системи змащування та ущільнень.....	68
3.4	Висновки до 3 розділу	69
4	БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	71
4.1	Правове забезпечення та організаційно–функціональна структура захисту населення.....	71
4.2	Небезпеки, що виникають при роботі на свердлильному верстаті та заходи щодо їх усунення.....	73
4.3	Змащувальні охолоджуючі рідини та їх використання на металообробних верстатах. Гігієна праці при роботі із ЗОР	75
4.4	Висновки до 4 розділу	77
	ВИСНОВКИ.....	78
	Перелік посилань.....	80
	ДОДАТКИ.....	86

ВСТУП

Конкурентоспроможність промисловості сьогодні визначається не масштабами виробництва, а здатністю швидко адаптуватися до змін, забезпечувати точність і стабільність технологічних процесів. Машинобудування, попри стрімкий розвиток цифрових технологій, залишається фундаментом економіки. Воно створює матеріальну основу для транспорту, енергетики, медицини та багатьох інших сфер.

У цьому контексті особливе місце займає верстатобудування. Рівень розвитку металорізального обладнання безпосередньо впливає на технологічні можливості підприємств і визначає якість виготовлення складних деталей. Свердлильні верстати є одним із найпоширеніших типів обладнання в механоскладальному виробництві. Вони незамінні при обробці корпусних деталей, зокрема картера коробки передач.

Картер має складну просторову форму. У ньому передбачено багато отворів різного діаметра та глибини. Важливо не лише виконати їх із високою точністю, а й забезпечити правильність взаємного розташування. Від цього залежить ресурс і надійність роботи всього агрегату.

Досягнення необхідних параметрів точності можливе лише за умови якісного проектування приводу головного руху верстата. Жорсткість конструкції, стабільність обертання шпинделя та діапазон регулювання швидкостей є чинниками, що формують технологічні можливості обладнання. Саме компоненти приводу визначають рівень точності і продуктивності процесу механічної обробки виробки.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>ВСТУП</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Вальчишин В.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Склярів Р.А.</i>					
<i>Реценз.</i>							
<i>Н. Контр.</i>		<i>Кабельник В.Р.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Крцпа В.В.</i>			<i>Лит.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
						7	2
						<i>ТНТУ ім. І. Пулюя зр. МВ-41, м. Тернопіль</i>	

Сучасна автоматизація виробництва дозволяє зменшити участь людини у фізичній праці та забезпечити відтворюваність результатів. Проте без ретельного конструювання приводу головного руху досягти потрібної точності неможливо. Це потребує аналізу існуючих рішень, застосування сучасних методів розрахунку й моделювання, а також пошуку нових інженерних підходів.

Метою роботи є розробка конструктивних рішень компонентів приводу головного руху свердлильного верстата, орієнтованих на підвищення точності та продуктивності при виготовленні деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2». Реалізація цієї мети дозволить покращити техніко-економічні показники обробки та створити основу для модернізації обладнання, призначеного для виробництва корпусних деталей складної форми.

Структура і обсяг роботи. Представлена кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів та основних висновків. Записка містить 79 аркушів пояснювального матеріалу, 13 рисунків та 17 таблиць. При виконанні роботи використано різноманітну спеціалізовану літературу, а також публікації з мережі Internet. Перелік літератури містить 49 найменувань, які розміщені на 6 сторінках, а також додатків. Загальний обсяг роботи становить 86 сторінок.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз завдання

Проектування технологічного процесу завжди починається з вихідних даних. У даному випадку основу складають креслення деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2» (див. рис. 1.1), опис базового технологічного процесу її виготовлення та річна програма випуску, яка становить 2000 одиниць. Такий обсяг виробництва за ДСТУ 2391:2010 [7] відповідає середньо-серійному типу. Він вимагає поєднання високої точності з економічною доцільністю і водночас потребує оптимізації кількості обладнання та операцій. Ці параметри визначають напрямок подальших технологічних розрахунків, результатом яких стає формування вихідних даних для проектування приводу головного руху свердлильного верстата

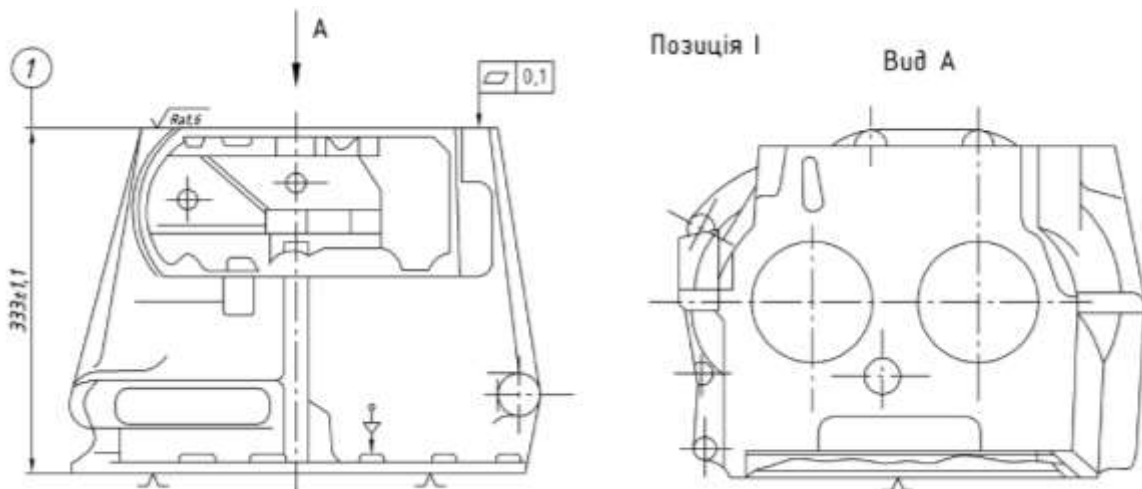


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2»

Картер коробки передач є базовою деталлю, що визначає конструкцію двоступеневого редуктора. Його складна форма зумовлює потребу у спеціальному технологічному оснащенні, яке забезпечує точність і стабільність обробки.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Разроб.		Вальчишин В.			Лит.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Склярів Р.А.				9	18
Реценз.					ТНТУ ім. І. Пулюя гр. МВ-41, м. Тернопіль		
Н. Кантр.		Кабельник В. Р.					
Затверд.		Крцпа В.В.					
					АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА		

«Картер коробки передач 26.11-Ж2» є виробом складної просторової форми. Він характеризується багатоплощинністю та відсутністю осьової симетрії. Виготовлення здійснюється методом лиття під тиском із алюмінієвого сплаву АК5М7 згідно з ДСТУ EN 1706:2014 [8]. Матеріал відзначається високою текучістю у рідкому стані та здатністю заповнювати тонкостінні порожнини складної конфігурації. Завдяки цьому можна отримати відливки з розвиненою внутрішньою геометрією. Габаритні розміри відливка становлять 450 × 320 × 340 мм.

Механічні властивості та хімічний склад алюмінієвого сплаву АК5М7 наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Механічні властивості та хімічний склад сплаву АК5М7

Група сплавів	Спосіб лиття	Вид термообробки	Тимчасовий опір, кгс/мм ²	Відносне видовження, %	Твердість, НВ				
			Не менше						
(Сплави на основі системи алюміній – кремній - мідь)	В піщаній формі	-	13	-	80				
	В кокіль	-	16	-	80				
	В кокіль	Штучне старіння без попереднього гартування	17	-	90				
	В піщаній формі	Штучне старіння без попереднього гартування	15	-	80				
	Хімічний склад сплаву								
		Алюміній (Al)	Магній (Mn)	Кремній (Si)	Марганець (Mg)	Мідь (Cu)	Цинк (Zn)	Залізо (Fe)	Домішки
		82.3-89.3	0.2-0.5	4.5-6.5	0.2-0.5	6.0-8.0	до 0.6	до 1.1	2.7

Конструкція картера насичена функціональними елементами. Передній фланець забезпечує стикування з картером гідротрансформатора. З'єднання виконується шпильками. Точне взаємне центрування гарантують два штифти, що встановлюються у спеціалізовані отвори діаметром 11 мм з полем допуску Н8.

					КРБ 23-351.00.00.000.ПЗ			Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				10

У нижній частині корпусу передбачено місце для кріплення масляного піддона. У центральній зоні розташоване гніздо під передній підшипник веденого вала. Задня стінка містить отвори для встановлення підшипників веденого та проміжного валів, а також прилив для запресування осі проміжної шестерні.

Підшипникові вузли проміжного та відомого валів закриваються кришками. На задній кришці монтується циліндр включення заднього ходу. Окрема технологічна площадка призначена для встановлення корпусу перемикача золотників периферійних клапанів. Люк для складання механізму заднього ходу герметизується кришкою. До цієї кришки кріпиться корпус гільзи головного золотника.

До жорсткості картера висуваються особливі вимоги. Навіть незначні пружні деформації корпусу під час роботи агрегату можуть спричинити перекося валів. Це веде до нерівномірного розподілу навантаження по довжині зубчастих вінців і знижує ресурс роботи. Тому забезпечення жорсткості є одним із ключових завдань як на стадії лиття, так і при механічній обробці.

Висока точність виконання базових поверхонь має вирішальне значення. Передній фланець A2 (елемент корпусу) виготовляється з допуском площинності 0.1 мм та параметром шорсткості $Ra1.0$ мкм. На ньому розташовані два центрувальні отвори діаметром 11 мм з полем допуску $H8$ і шорсткістю $Ra1.6$ мкм. Вони мають фаски $0.6 \times 45^\circ$. Відхилення від перпендикулярності осей цих отворів відносно площини A2 не повинно перевищувати 0.02 мм на довжині 100 мм. Крім того, корпус містить шістнадцять кріпильних отворів діаметром 11 мм з полем допуску $H14$, шорсткістю $Ra12.5$ мкм та фасками аналогічних параметрів.

Згідно з кресленням додатково контролюється лінійний розмір 333 ± 1 мм. Він визначає положення відповідальної поверхні відносно конструкторської бази. Для цього елемента задано шорсткість $Ra1.6$ мкм та допуск 0.1 мм. Такі вимоги характерні для монтажних базових поверхонь, де навіть мінімальні відхилення можуть вплинути на працездатність системи.

					<i>КРБ 23-351.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Задній фланець картера повинен бути витриманий паралельно до площини А2. Допустиме відхилення не перевищує 0.05 мм на довжині 100 мм. Це забезпечує коректний монтаж силового регулятора та допоміжних механізмів.

Технологічний аналіз конструкції показує як раціональні, так і складні з технологічної точки зору рішення. До раціональних належить виконання різьбових отворів М10 для кріплення кришок підшипників наскрізними. Це спрощує їх обробку і полегшує видалення стружки. Водночас значна кількість глухих отворів ускладнює процес механічної обробки. Окрему проблему становлять отвори, розташовані у важкодоступних місцях. Наприклад, обробка отвору Ø30 мм можлива лише із зворотного боку із застосуванням знімних цековок, що монтуються на оправку після її проведення крізь отвір.

Інші поверхні картера не створюють суттєвих технологічних труднощів. Вони можуть бути оброблені із забезпеченням необхідних параметрів точності та якості поверхневого шару.

Згідно заводського технологічного процесу (ТП) обробка деталі здійснюється за маршрутною технологією, яка передбачає виконання включає великої кількості операцій на різному обладнанні (див. табл. 1.1).

Таблиця 1.1 - Базовий варіант ТП виготовлення деталі картер

№ операції	Назва операції та її зміст	Модель верстата
1	2	3
005	Карусельно-фрезерна: Фрезерувати поверхні 1, 2, 3, 4 послідовно.	6M23
010	Зачистка: Зачистити заусенець, притупити гострі кромки.	Підставка 591Т-00-000
015	Вертикально-фрезерна: Фрезерувати поверхню 1 (1,6; 0,1).	FSS400V-2
020	Зачистка: Зачистити заусенець, притупити гострі кромки.	-
025	Радіально-свердлильна: Свердлити два отвори поверхонь 5, 6 (Ø9,6+0,2 мм; 3,2).	2M55

1	2	3
030	Вертикально-розточна: Розточити отвори поверхонь 7, 8, 9 ($\varnothing 128+0,1$ мм, $\varnothing 118+0,1$ мм, $\varnothing 118+0,1$ мм відповідно).	Напівавтомат 9A524
035	Алмазно-розточна: Розточити два отвори поверхонь 5, 6 до $\varnothing 11$ мм, 1,6 одночасно.	Напівавтомат КК-133
040	Контрольна: Перевірити відповідність розмірів і технічним вимогам поверхні 1...9.	-
045	Токарна-гвинторізна: Підрізати поверхню 16 послідовно.	1M63
050	Вертикально-свердлильна: Свердлити 16 отворів поверхонь 17 $\varnothing 11$ мм одночасно.	Напівавтомат 2C170C783
055	Слюсарна: Зенкувати 16 отворів поверхонь 18 фасками $\varnothing 0,5 \times 45^\circ$.	Свердлильна машина СЛ-9С
060	Радіально-свердлильна: Свердлити 2 отвори пов. 19, 2 отвори пов. 20, 7 отворів пов. 21 послідовно.	2M55
065	Радіально-свердлильна: Свердлити 4 отвори пов. 22, 14 отворів пов. 23, отвір пов. 24 послідовно. Свердлити 21 отвір пов. 25 послідовно.	Радіально- свердлильний
070	Спеціальна фрезерна: Фрезерувати поверхні 26, 27 послідовно.	2H135
075	Горизонтально-фрезерна: Фрезерувати поверхню 28.	6M82Г
080	Вертикально-фрезерна з ЧПК: Фрезерувати 11 бобишок поверхонь 29 по програмі.	6P13Ф2
085	Агрегатно-свердлильна: Свердлити отвори 30, 31 ($\varnothing 16$); розсвердлити 31 ($\varnothing 18$); зенкувати 30 ($\varnothing 23,6$), 31 ($\varnothing 17,6$), фаску 32, отвори 33, 34 ($\varnothing 42$); розвернути 30, 31 одночасно; зенкувати 33, 34.	Агрегатний АМ-8849
090	Радіально-свердлильна: Свердлити 2 отвори 35, отвір 36, 3 отвори 37. Зенкувати фаску 38, три фаски 39 послідовно.	2M55

1	2	3
095	Радіально-свердлильна: Зенкувати фаску 45; нарізати різь 46; свердлити 47; свердлити 2 отвори 48 та 2 фаски 49; розточити 2 отвори 50; свердлити 51 (Ø23); зенкувати 52; цекувати 53; зенкувати 54; нарізати різь 52; свердлити 55, 56; розсвердлити 55 (Ø10,2); зенкувати 56; нарізати різь 55.	2M55
100	Технічний контроль: Повна перевірка виробу.	-
105	Радіально-свердлильна: Свердлити отвір 57 (Ø11,2); зенкувати фаску 58; нарізати різь 57.	2H55
110	Радіально-свердлильна: Свердлити отвір 59, 2 отвори 60, 2 отвори 61, 2 отвори 62.	2H55
115	Радіально-свердлильна: Зенкувати: 7 фасок 63, 4 фаски 64, 2 фаски 65, 21 фаску 66, 21 фаску 67 послідовно.	VR-2
120	Горизонтально-фрезерна: Фрезерувати поверхні 68, 69 одночасно.	6P82Г
125	Алмазно-розточна: Підрізати поверхні 70, 71 одночасно.	Напівавтомат КК-730
130	Алмазно-розточна: Розточити отвори 72, 73, фаску 74 послідовно.	Напівавтомат 2705
135	Алмазно-розточна: Розточити поверхні 75, 76, фаску 77, поверхню 78, фаску 79.	Напівавтомат ОС169
140	Слюсарна: Зенкувати фаску 80; нарізати різь 81.	Верстак 517Т- 00-000
145	Контрольна: Кінцевий контроль деталі.	

Для картера коробки передач, що виготовляється в умовах середньосерійного виробництва, визначальними є габаритні розміри 440 × 320 × 340 мм, маса близько 15 кг, складна коробчаста форма та матеріал АК5М7 згідно з ДСТУ EN 1706: 2014. З огляду на ці умови було розглянуто два найбільш прийнятні способи виготовлення заготовки, а саме: лиття в кокіль та лиття під тиском.

					<i>КРБ 23-351.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Лиття в кокіль дозволяє багаторазово використовувати форму. Воно забезпечує підвищену точність розмірів і якість поверхонь у порівнянні з піщаними формами. Метод відзначається низькою трудомісткістю, невеликою собівартістю та сприятливими умовами праці. Він не потребує високої кваліфікації робітників і дає можливість отримувати заготовки з невеликими припусками.

Лиття під тиском має додаткові переваги. Воно забезпечує точність 7-12 квалітету, меншу шорсткість поверхонь у межах $Ra\ 3.2 \dots 12.3$ мкм [25], можливість формування тонкостінних елементів товщиною до п'яти міліметрів, отворів і навіть різьбових ділянок без подальшої обробки. Припуски на механічну обробку значно зменшуються. Недоліком є висока вартість прес-форм, що обмежує економічну ефективність у дрібносерійному виробництві.

Попередній техніко-економічний розрахунок показав, що лиття під тиском забезпечує нижчу вартість заготовки. Хоча різниця невелика, цей метод дає суттєво вищу точність і якість поверхонь. Це дозволяє скоротити обсяг механічної обробки, підвищити продуктивність і стабільність виготовлення корпусної деталі.

Аналіз базового заводського технологічного процесу підтверджує доцільність такого вибору. Обробка картера здійснюється за маршрутною технологією, яка передбачає понад тридцять операцій на різнотипному обладнанні. Спочатку виконується чорнова обробка базових площин, далі проводиться розточування відповідальних отворів, після чого йде велика кількість свердлильних переходів. Значну частку становлять ручні зачисні та слюсарні роботи, що збільшують трудомісткість і створюють ризик суб'єктивного впливу на якість.

До недоліків базового ТП слід віднести моральне та фізичне старіння верстатного парку. Переважна більшість операцій виконується на універсальних верстатах із ручною системою керування, що не дозволяє забезпечити стабільність точності в межах серійного випуску. За таких умов фактичні параметри обробки мають значний розкид і залежать від кваліфікації та стану оператора. Вплив людського фактора стає критичним при виконанні

					<i>КРБ 23-351.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		15

відповідальних переходів, особливо коли вони розосереджені по різних верстатах і супроводжуються багаторазовими переустановленнями деталі.

Особливо гостро ця проблема проявляється за умов серійного виробництва, коли партія сягає двох тисяч одиниць. Забезпечити однакову якість обробки для всіх виробів при використанні застарілого обладнання надзвичайно складно. Відтворюваність геометричних характеристик виявляється низькою, що змушує вводити посилений контроль і призводить до додаткових виправлень або навіть браку.

Використання заготовки, отриманої литтям під тиском, дозволяє оптимізувати процес. Операція 015 стає недоцільною, адже потрібну точність можна забезпечити вже на етапі операції 005. Операції 050 і 055 скорочуються, оскільки отвори та фаски формуються безпосередньо під час лиття. Замість двох радіально-свердлильних операцій (060 та 065) доцільно застосувати агрегатно-свердлильну, що підвищує точність і скорочує час обробки.

Таким чином, заготовка для деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2» буде отримуватись литтям під тиском. Це рішення не лише знижує вартість і масу деталі, а й створює передумови для модернізації технологічного процесу. Вдосконалення приводу головного руху свердлильного верстата є необхідною умовою підвищення технологічної надійності, зменшення впливу людського фактора та досягнення стабільної точності обробки в умовах серійного виробництва.

Одним із ключових обмежень чинного технологічного процесу є надмірне енергоспоживання та високі експлуатаційні витрати. Використання обладнання попередніх поколінь не відповідає сучасним вимогам енергоефективності, визначеним стандартом ДСТУ ISO 14955-1:2019 [9]. У серійному виробництві це прямо впливає на собівартість кожної деталі та знижує економічну доцільність застосування застарілих технологій.

Проблема ускладнюється тим, що більшість операцій виконуються на універсальних верстатах із ручним керуванням. Таке обладнання не лише витрачає більше енергії, ніж сучасні аналоги з ЧПК, а й не забезпечує

					<i>КРБ 23-351.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		16

стабільності точності. У результаті параметри обробки мають значний розкид, що змушує вводити додатковий контроль і збільшує трудомісткість виробництва.

Для серійного випуску, коли партія сягає двох тисяч одиниць, ці недоліки стають критичними. Забезпечити однакову якість усіх деталей на застарілому обладнанні практично неможливо. Це призводить до зростання кількості виправлень, втрат часу та навіть браку.

Оптимізація виробництва потребує переходу на сучасне обладнання з числовим програмним керуванням. Така модернізація дозволить скоротити тривалість технологічного циклу, знизити енергоспоживання, забезпечити стабільність параметрів точності та підвищити відтворюваність якості. У результаті виробництво стане економічно ефективним і конкурентоспроможним у межах серійного випуску.

1.2 Характеристика об'єкту виробництва

Деталь «Картер коробки передач 26.11-Ж2» належить до корпусних виробів і має складну просторову форму з великою кількістю площин та функціональних елементів. Високі вимоги до точності взаємного розташування отворів визначають її як базовий об'єкт для формування технологічних рішень, спрямованих на підвищення продуктивності та стабільності обробки, а також для обґрунтування параметрів приводу головного руху верстата.

Заготовка виготовляється литтям під тиском зі сплаву АК5М7. Це алюмінієвий ливарний сплав із вмістом міді та кремнію, який поєднує добрі ливарні властивості з достатньою міцністю. Твердість у межах *НВ 70 ... 100* вимагає стабільності обертів шпинделя, щоб уникнути вібрацій і забезпечити якість поверхні. Найбільш відповідальними елементами є шістнадцять кріпильних отворів $\varnothing 11$ мм на передньому фланці А2, два центрувальні отвори $\varnothing 11$ мм з допуском *IT8*, що потребують високої точності та перпендикулярності до площини, а також базові отвори $\varnothing 128$ *H7* та $\varnothing 118$ *H7*, які визначають положення валів трансмісії.

					<i>КРБ 23-351.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		17

Аналіз базового технологічного процесу показав, що обробка 16 кріпильних отворів здійснюється на напівавтоматі 2С170С783, а зенкування фасок виконується на свердлильній машині СЛ-9С. Така схема має низьку стабільність через значну кількість ручних переходів і вплив людського фактору.

Сучасні методи обробки передбачають використання обробних центрів із числовим програмним керуванням для виконання основних операцій. Отвори та фаски, позначені у кресленні як поверхні 35–39, розташовані у важкодоступних місцях. Їх обробку доцільно виконувати на радіально-свердлильному верстаті 2М55, де можливе застосування комбінованого інструменту (свердло-зенкер) для суміщення переходів і підвищення продуктивності.

Проектування приводу головного руху безпосередньо пов'язане з параметрами обробки на верстаті 2М55. Необхідно забезпечити діапазон частот, що відповідає швидкостям різання для свердління отворів $\varnothing 5 \div 12$ мм в алюмінієвому сплаві ($n_{max} \approx 4000 \div 5000$ об/хв). Важливо забезпечити достатній крутний момент для нарізання різьби та роботи комбінованим інструментом, оскільки сумарний опір різанню в таких умовах перевищує стандартний. Жорсткість приводу має гарантувати точність $IT8$ при розгортанні отворів $\varnothing 11$ мм у важкодоступних зонах, особливо при значному вильоті шпинделя.

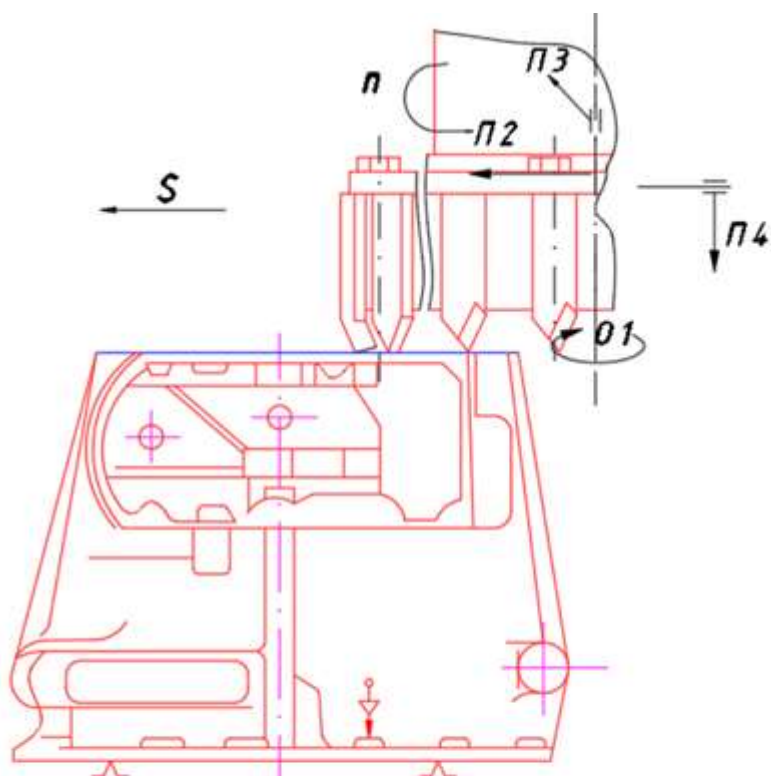
1.3 Аналіз формоутворення оброблюваних поверхонь та вибір раціональних схем оброблення поверхонь

Забезпечення геометричної точності та відповідності поверхонь деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2» вимагає узгодження її складної просторової конфігурації з кінематичними можливостями обладнання. Морфологічні характеристики корпусу, що включають численні отвори, фаски та базові посадочні поверхні, повинні бути співвіднесені з режимами обробки та траєкторіями руху інструмента. Кожен технологічний перехід визначається комбінацією відносних рухів заготовки та інструмента [21], яка формує

					<i>КРБ 23-351.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		18

необхідну точність і чистоту поверхні. Особливу роль відіграють операції свердління та розгортання отворів, адже саме вони задають точність взаємного розташування елементів трансмісії та забезпечують функціональність вузла.

Фрезерна обробка. У базовому технологічному процесі деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2» операції фрезерування спрямовані на формування периферійних ділянок корпусу та базових площин. Формоутворення здійснюється завдяки обертанню фрези як головному руху та поступальному переміщенню заготовки по координатних осях як руху подачі. Така комбінація рухів забезпечує необхідну точність і чистоту поверхні, особливо у зонах, що виконують базову функцію при складанні трансмісії (див. рис. 1.2).

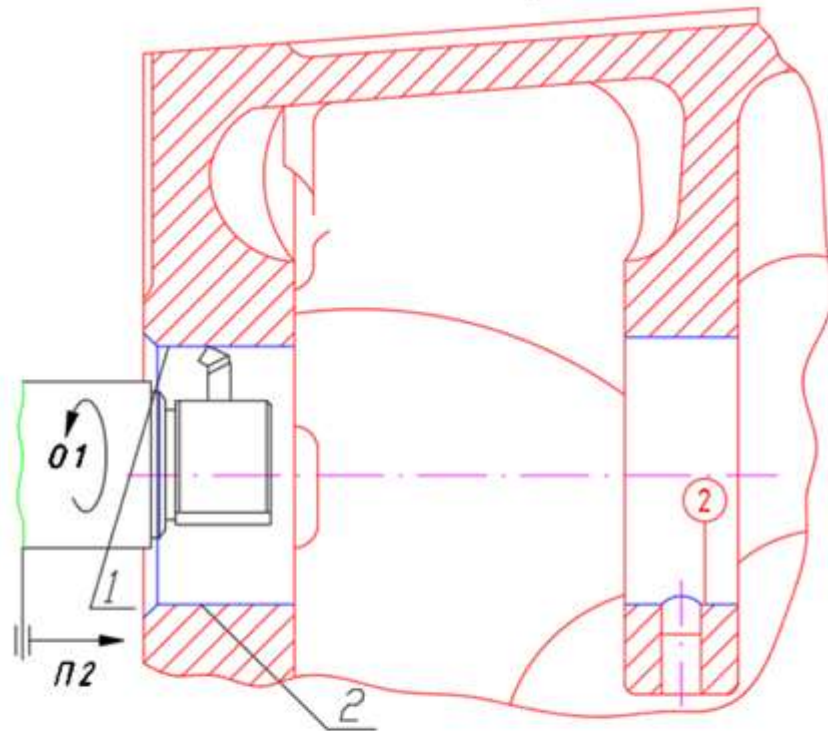


Відтворюючі лінії		Різальне лезо	Кількість ФУР	ФУР	Виконавчі рухи	Характеристика ФУР
Твірна	Коло	Слід	1	Фv(01)	Уст(П3)	Простий
Направ.	Пряма	Слід	1	Фs(П2)	Уст(П4)	Простий

Рисунок 1.2 – Набір формоутворюючих рухів при обробці торцевою фрезою

Токарна обробка (розточування). У технологічному процесі виготовлення деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2» важливим етапом є

формування внутрішніх посадочних отворів (див. рис. 1.3). Ці отвори забезпечують точність центрування та правильність роботи підшипників і зубчастих передач, тому їх геометрія має бути витримана з високою точністю.



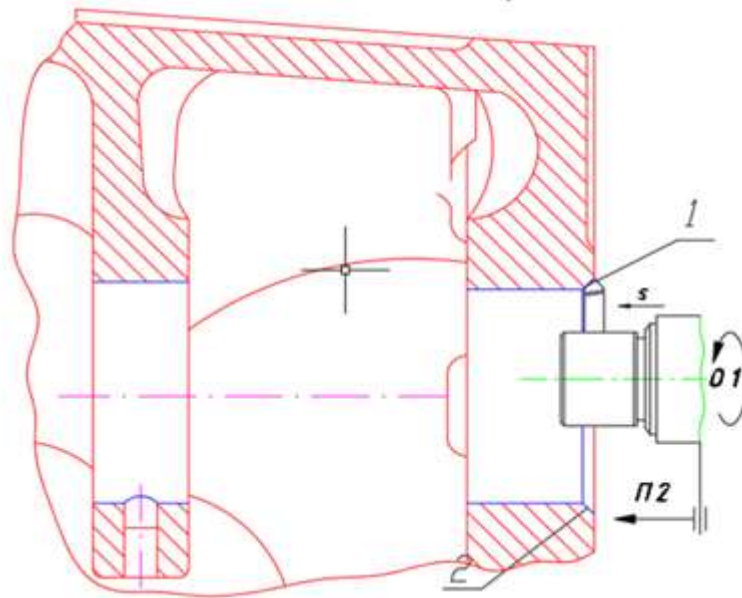
Відтворюючі лінії		Різальне лезо	Кількість ФУР	ФУР	Виконавчі рухи	Характеристика ФУР
Твірна	Коло	Слід	1	Фv(O1)	Уст(П3)	Простий
Направ.	Пряма	Слід	1	Фs(П2)	Уст(П4)	Простий

Рисунок 1.3 – Набір формоутворюючих рухів при розточуванні отворів

Розточування реалізується за схемою, де головним рухом виступає обертання інструмента, а рух подачі здійснюється поступальним переміщенням різця вздовж осі отвору. Така кінематична комбінація дозволяє досягти необхідної точності та чистоти поверхні.

Формування фасок операцією розточування. Для отримання фасок із параметрами $2 \times 45^\circ$ в деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2» необхідне узгодження поздовжньої та поперечної подачі інструмента. Оскільки заготовка залишається нерухомою, усі формоутворюючі рухи виконує інструмент. Так головний рух забезпечується його обертанням, а допоміжні рухи реалізуються

поступальним переміщенням по координатних осях. Така кінематична схема дозволяє сформувати фаски з необхідними геометричними параметрами та чистотою поверхні (див. рис. 1.4).



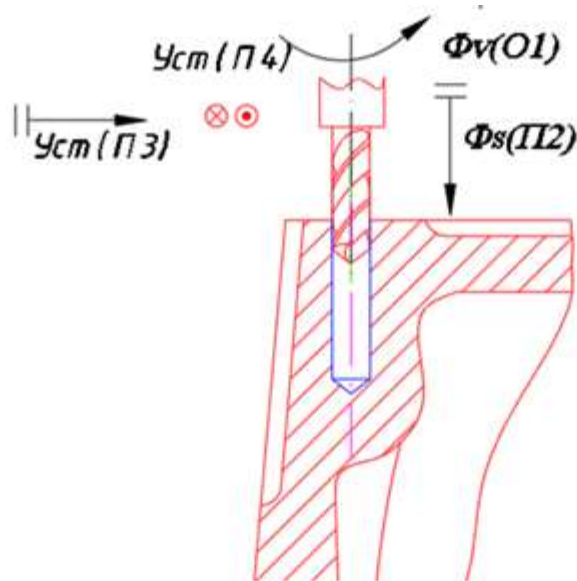
Відтворюючі лінії		Різальне лезо	Кількість ФУР	ФУР	Виконавчі рухи	Характеристика ФУР
Твірна	Коло	Копіюв.	0		Уст(П2)	Простий
Направ.	Пряма	Слід	1	Фv(01)		Простий

Рисунок 1.4 – Набір формоутворюючих рухів при розточуванні фаски

Осьова обробка отворів (операції свердління та зенкування). В процесі виготовлення корпусної деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2» формуються отвори різного типу, як наскрізні, так і глухі. Вони можуть виконувати функцію кріпильних елементів, а також слугувати направляючими при базуванні та під час складання вузла. Саме тому їх геометрична точність і якість кромки мають вирішальне значення для подальшої експлуатації.

Формоутворення (див. рис. 1.5) здійснюється поєднанням головного обертального руху інструмента та поступального осьового переміщення подачі. Попри простоту кінематичної схеми процес вимагає високої жорсткості системи ВПД, адже навіть незначні коливання можуть призвести до відхилень у розташуванні отворів чи дефектів фасок. Для глухих отворів особливо важливим

є контроль глибини, тоді як для наскрізних критичною є точність співвісності та якість виходу інструмента.



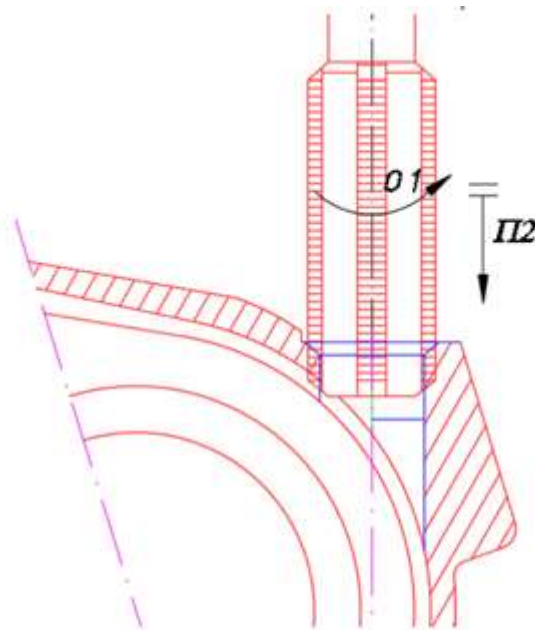
Відтворюючі лінії		Різальне лезо	Кількість ФУР	ФУР	Виконавчі рухи	Характеристика ФУР
Твірна	Коло	Слід	1	Фv(О1)	Усм(П3)	Простий
Направ.	Пряма	Датик	2	Фv(О1) Фs(П2)	Усм(П4)	Простий

Рисунок 1.5 – Набір формоутворюючих рухів при свердлінні та зенкуванні

Згідно з технологічним процесом у корпусній деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2» може виконуватися операція нарізання різьби мітчиком. Вона застосовується для формування кріпильних елементів, що забезпечують надійність з'єднання та правильність складання вузла. У процесі реалізується комплекс формоутворюючих рухів (див. рис. 1.6), де головний рух забезпечується обертанням інструмента, а подача здійснюється поступальним переміщенням уздовж осі отвору.

Різноманітність операцій при виготовленні картера коробки передач підтверджує потребу у гнучких технологічних рішеннях. Важливо, щоб формоутворюючі рухи узгоджувалися з морфологією деталі. У серійному виробництві доцільним є концентрування переходів у межах одного маршруту. Це скорочує допоміжний час і водночас стабілізує параметри точності.

Сучасні обробні центри з числовим програмним керуванням відкривають нові можливості. Вони дозволяють інтегрувати свердління, розточування, зенкування, фрезерування та нарізання різьби в єдиний цикл. Така інтеграція не лише економить час, а й зменшує похибки, що виникають при переналагодженні. Автоматизоване позиціонування забезпечує точність, а висока динамічна жорсткість і широкий діапазон швидкостей головного руху створюють умови для ефективного виконання чорнових і чистових переходів.



Відтворюючі лінії		Різальне лезо	Кількість ФУР	ФУР	Виконавчі рухи	Характеристика ФУР
Твірна	Коло	Копюв.	0	0	Вр(ПЗ)	Простий
Напрв.	Твірна	Слід	1	Фv(01П2)	ВР(ПЗ)	Складний

Рисунок 1.6 – Набір формоутворюючих рухів при нарізанні різі мітчиком

1.4 Огляд літератури

На концептуальному етапі проектування неможливо обійтися без фундаментальних положень теорії технічних систем [18]. Вони дозволяють відійти від спрощеного уявлення верстата як механічної сукупності вузлів і перейти до його інтерпретації як багаторівневої структури, де кожен компонент має визначену роль у загальній роботоздатності. Принцип цілісності забезпечує

перетворення механічних, електричних та програмних підсистем у єдиний технологічний комплекс. Завдяки цьому обладнання здатне відтворювати задані параметри точності та продуктивності, а також зберігати стабільність у процесі експлуатації.

У цьому контексті особливого значення набуває системний аналіз [28, 29]. Він створює методологічне підґрунтя для дослідження внутрішньої структури обладнання та виявлення взаємозв'язків між його елементами. На відміну від традиційного підходу, що зосереджується на окремих вузлах, системний аналіз дозволяє оцінити ефекти від взаємодії різномірних компонентів. Для сучасних верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК) це критично, адже механічна жорсткість, динаміка електроприводів і логіка програм повинні перебувати у збалансованій взаємодії. Порушення цього балансу призводить до зниження точності обробки, тому своєчасне виявлення потенційних зон конфліктів на стадії ескізного проєктування є ключовим завданням.

Методи науково-технічного прогнозування [20, 26, 27] займають особливе місце. Вони перетворюють проєктування на процес інтелектуального моделювання майбутніх станів системи. Якщо класичні розрахунки працюють із номінальними режимами, то прогнозування охоплює широкий спектр експлуатаційних умов, включаючи граничні навантаження та нештатні ситуації. Математичне моделювання й імітаційні експерименти дозволяють ще до виготовлення прототипу визначити його технічні характеристики та критичні параметри конструкції.

Кваліфікаційна робота бакалавра має виражений розрахунково-конструкторський характер і орієнтована на вирішення прикладних інженерних завдань у галузі верстатобудування. Її виконання базується на загальноприйнятих методиках визначення кінематичних та міцнісних характеристик вузлів металообробного обладнання. Структура роботи сформована відповідно до нормативних вимог [13], що забезпечує логічну послідовність викладення, методологічну обґрунтованість та наступність переходу від аналізу технологічного завдання до графічної реалізації конструкторських рішень.

					<i>КРБ 23-351.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		24

Згідно з дослідженнями [4], одним із ефективних способів оцінки точності виконавчих рухів металорізальних верстатів є використання методу ітерацій. Такий підхід дозволяє на етапі проєктування глибше проаналізувати похибки подач та їхній взаємозв'язок із головним рухом.

При виборі конструктивних параметрів приводу важливо враховувати мікрогеометрію обробленої поверхні. Як зазначено в праці [5], випадкові коливання процесу, зокрема нестабільність подачі та вібрації у кінематичних ланцюгах, суттєво впливають на висоту мікронерівностей. При точінні чи розточуванні динамічні збурення у приводі можуть призвести до погіршення шорсткості, що безпосередньо позначається на якості готового виробу.

Для свердлильного верстата визначальним фактором є статична та динамічна жорсткість приводу. Дослідження [14] доводять, що жорсткість вертикально-свердлильних верстатів прямо впливає на стабільність положення осі шпинделя під навантаженням. Висока жорсткість забезпечує точність позиціонування інструмента та зменшує ризик відхилень при обробці корпусних деталей.

Не менш важливим аспектом модернізації є кінематична точність механізму подач. У праці [15] показано, що похибки кінематичних ланцюгів створюють мікроколивання інструмента, які знижують якість обробки. Тому проєктування приводу має враховувати мінімізацію цих похибок і забезпечувати стабільність подачі.

Ефективність процесу значною мірою визначається якістю виходу інструмента з матеріалу. Як зазначено у роботі [16], регулювання подачі при свердлінні наскрізних отворів дозволяє підвищити стійкість інструмента та якість поверхні. Це особливо актуально для серійного виробництва, де стабільність параметрів обробки має вирішальне значення.

Особливе місце у технологічному процесі обробки картера займає формування внутрішніх різбових поверхонь. Складність доступу до окремих отворів вимагає високої точності синхронізації рухів приводу. Як показано в праці [31], ефективним інструментом для створення схем формоутворення різей є принципи структурно-векторного синтезу. Цей метод дозволяє розглядати

					<i>КРБ 23-351.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

процес різьбонарізання як результат взаємодії векторів швидкостей головного руху та подачі у кожній точці контакту різальної кромки з матеріалом.

1.5 Висновки до 1 розділу

Аналітична частина показала, що деталь «Картер коробки передач 26.11-Ж2» є складним корпусним виробом, виготовлення якого потребує високої точності та стабільності технологічних процесів. Вибір алюмінієвого сплаву АК5М7, отриманого литтям під тиском, забезпечує необхідні механічні властивості, точність і якість поверхонь, а також створює передумови для зменшення припусків і скорочення обсягу механічної обробки.

Аналіз базового технологічного процесу виявив значну кількість операцій, виконуваних на застарілому універсальному обладнанні, що призводить до високої трудомісткості, нестабільності точності та залежності від людського фактора. Це особливо критично для серійного виробництва з річною програмою у 2000 одиниць, де відтворюваність параметрів має вирішальне значення.

Оптимізація виробництва можлива завдяки переходу на сучасні методи обробки з використанням верстатів із числовим програмним керуванням, що дозволяє скоротити тривалість технологічного циклу, знизити енергоспоживання та забезпечити стабільність якості. Вибір лиття під тиском як способу отримання заготовки є економічно доцільним і технологічно виправданим, адже він зменшує кількість операцій, підвищує продуктивність і створює умови для модернізації приводу головного руху свердлильного верстата.

					<i>КРБ 23-351.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Особливості запропонованого ТП обробки деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2»

Аналіз базового заводського маршруту (табл. 1.1) показав низку недоліків. Надмірна кількість ручних переустановок, використання застарілого обладнання та значна частка слюсарних робіт могли привести до втрати точності обробки, зниження стабільності геометричних параметрів та підвищення трудомісткості виробництва.

У таблиці 2.1 представлено проєктний варіант технологічного процесу обробки деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2».

Таблиця 2.1 – Маршрут проєктного ТП обробки картера

№ операції	Найменування операції	Обладнання (модель)
005	Вертикально-фрезерна з ЧПК (базові поверхні)	DMG CMX 800v
010	Горизонтально-фрезерна-розточувальна з ЧПК	DMG MORI NHX 4000
015	Вертикально-свердлильна з ЧПК	Doosan DNM 4000
020	Радіально-свердлильна	2M55
025	Горизонтально-свердлильна-розточувальна з ЧПК	DMG MORI NHX 4000
030	Контрольна (координатно-вимірвальна)	Hexagon

Запропонований маршрут виготовлення картера сформовано на основі практичних рішень, що враховують сучасні тенденції організації обробки та досвід інших машинобудівних підприємств. Поєднання розрізаних переходів у багатофункціональні операції дало змогу скоротити їхню кількість із тридцяти п'яти до семи. Ручні операції зачищення та видалення задирок замінено механізованим зачищенням поверхонь із застосуванням щіткових головок та фасочних фрез, які виконується безпосередньо в робочій зоні верстата.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Вальчишин В.</i>			<i>Лист.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Склярів Р.А.</i>				27	13
<i>Реценз.</i>					<i>ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Кабельник В. Р.</i>			<i>ТНТУ ім. І. Пулюя</i>		
<i>Затверд.</i>		<i>Крцпа В.В.</i>			<i>зр. МВ-41, м. Тернопіль</i>		

Використання сучасних горизонтальних центрів із точністю позиціювання до $\pm 0,002$ мм забезпечує досягнення квалітетів *IT6 – IT7* та усуває похибки переустановок. Водночас у структурі процесу збережено застосування радіально-свердлильного верстата 2M55 для локальної обробки важкодоступних поверхонь, що є економічно виправданим рішенням.

В таблиці 2.2 подано розроблену проектну маршрутну технологію для обробки деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2».

Таблиця 2.2 – Проектна маршрутна технологія обробки картера

Назва операції та зміст переходів	Виконавчі розміри, мм та технічні вимоги
1	2
005 Вертикально-фрезерна з ЧПК	
1. Фрезерувати площину основи (остаточно)	$333 \pm 1,1$; <i>Ra</i> 1,6
2. Фрезерувати приливи та тех. бази (8 пов.)	$106 \pm 0,2$; <i>Ra</i> 3,2
3. Контурне фрезерування 11-ти бобишок	$R50 \pm 0,1$; $R62,5 \pm 0,1$; <i>Ra</i> 12,6
010 Горизонтально-фрезерна-розточувальна з ЧПК	
1. Розточити головні отвори (3 пов.)	$\varnothing 128,8^{+0,1}$; $2 \times \varnothing 118,8^{+0,1}$; <i>Ra</i> 6,3
2. Прецизійне розточування посадкових отворів	$\varnothing 130H8$; $\varnothing 120H8$; <i>Ra</i> 0,4
3. Свердлити та розгорнути 2 технологічні отвори	$2 \times \varnothing 11H8^{+0,027}$ <i>Ra</i> 1,6
4. Підрізати поверхні 2, 4, 7 та розточити фаску 1	$\varnothing 129$; фаска $1 \times 45^\circ$; <i>Ra</i> 6,3 ... 12,6
5. Фрезерувати поверхні 6 та 3 послідовно	$\varnothing 258 (2 \times R129)$; <i>Ra</i> 12,6
6. Підрізати торець (поверхня 5)	$L = 26_{-0,52}$; <i>Ra</i> 6,3
015 Вертикально-свердлильна з ЧПК	
1. Свердлити та зенкувати 16 отворів	$16 \times \varnothing 11^{+0,43}$; фаски $0,6 \times 45^\circ$
2. Свердлити 12 отв. під різьбу <i>M10</i>	$12 \times \varnothing 8,5$; фаски $1,2 \times 45^\circ$
3. Свердління 8 отворів під різьбу <i>M8</i>	$8 \times \varnothing 6,7$; фаски $1,0 \times 45^\circ$
4. Свердління 3 отворів під різьбу <i>M6</i>	$3 \times \varnothing 5,0$; фаски $0,8 \times 45^\circ$
5. Свердління 4 отворів $\varnothing 11,2$	$\pm 0,2$
6. Свердління 1 отвору $\varnothing 17$	$\pm 0,2$
7. Свердління 1 отвору $\varnothing 19$	$\pm 0,2$
8. Цекування бобишок (11 поверхонь)	$\varnothing 13$; <i>Ra</i> 6,3
9. Нарізання різьби <i>M10</i>	$12 \times M10 \times 1,25$
10. Нарізання різьби <i>M8</i>	$8 \times M8 \times 1$
11. Нарізання різьби <i>M6</i>	$3 \times M6$
12. Нарізання конічної різьби	<i>КГ 1/4"</i>

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						28

1	2
13. Нарізання конічної різьби	КГ 1/8"
14. Механізоване зачищення поверхонь	відсутність гострих кромки
020 Радіально-свердлильна	
1. Свердлити 2 отвори та зенкувати фаски	2 × Ø9,3 ^{+0,15} ; 2 фаски 1 × 45°
2. Свердлити 3 отвори та зенкувати фаски	3 × Ø11 ^{+0,43} ; 3 фаски 0,6 × 45°
025 Горизонтально-свердлильна-розточувальна з ЧПК	
1. Свердлити отвір Ø24	попередній розмір
2. Розгорнути отвір Ø24	Ø24 ^{+0,045} ; Ra 1,6
3. Свердлити отвір Ø18	попередній розмір
4. Розгорнути отвір Ø18	Ø18 ^{+0,035} ; Ra 1,6
5. Зенкувати 2 отвори Ø46 (поверхня 1, 2)	попередній розмір
6. Розточити 2 отвори Ø46,2	2 × Ø46,2 ^{+0,2} ; Ra 1,6
030 Контрольна	
1. Контролювати розміри	Згідно з вимогами

2.2 Обґрунтування та вибір різального інструменту

Вибір інструменту для обробки корпусної деталі деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2». визначався вимогами до точності $IT7 - IT9$ та параметрами шорсткості поверхонь $Ra = 1,6 \dots 6,3$ мкм. Автоматизоване виробництво потребує стабільності розмірів у партії, швидкої переналадки та контрольованого стружкоутворення.

Згідно виданого завдання матеріалом заготовки є алюмінієвий сплав АК5М7. Він відзначається високою в'язкістю і схильністю до утворення наросту на ріжучій кромці. Це вимагає інструменту зі спеціальною геометрією та якісною обробкою передньої поверхні.

Для свердлильних і фрезерних операцій на обробних центрах (операції 005, 010, 015, 025) використано серію *NM (Non Ferrous Materials)* від *Sandvik Coromant*. Збільшений передній кут γ та дзеркальне полірування стружкових канавок зменшують тертя і запобігають налипанню алюмінію. При швидкостях різання понад 200 м/хв це критично для стабільності процесу.

						<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			29

Для операції 020, що виконується на верстаті 2M55 будемо використовувати твердосплавні свердла-зенкери компанії *Supreme (Walter)* серії DC170, які оптимізовані для роботи в діапазоні 100 ÷ 150 м/хв. Ці інструменти мають внутрішнє охолодження, поліровані канавки та спеціальну геометрію для обробки кольорових металів, що забезпечує стабільне стружкоутворення та високу стійкість.

У переходах 015 та 020 застосовано комбіновані ступеневі свердла *CoroDrill® 430*. Вони виконують свердління та зенкування фаски за один хід. Це скорочує допоміжний час, забезпечує співвісність елементів отвору і звільняє місце в магазині інструментів.

Для прецизійного розточування головних посадкових отворів ($\varnothing 130$, $\varnothing 120$, $\varnothing 46,2$) використано систему *CoroBore® 825*. Мікрометричний механізм налаштування з дискретністю 0,002 мм дозволяє компенсувати знос і теплове розширення безпосередньо у робочій зоні. Це гарантує точність IT6 – IT7 та чистоту поверхні.

Матеріали ріжучої частини підібрано диференційовано. Для свердел і розгортки застосовано *H10F*, непокритий твердий сплав із максимальною гострою кромкою, а для токарних і фрезерних пластин використано *H10*, що забезпечує чистоту поверхні навіть при великих подачах.

Закрита конструкція картера та глибокі глухі отвори потребують внутрішнього підведення мастильно-охолоджувальної рідини (MOP) під високим тиском. Це охолоджує зону різання і ефективно видаляє стружку, знижуючи ризик поломки інструменту.

В таблиці 2.3 приведено характеристики призначених інструментів та їх різальних частин.

Таблиця 2.3 – Рекомендовані інструменти за переходами

Назва та зміст переходу	Рекомендований інструмент
1	2
005 Вертикально-фрезерна з ЧПК	
1. Фрезерувати площину основи (остаточно)	<i>CoroMill® 790</i> $\varnothing 100$, [43] <i>R790 – 100C8S1 – 22H</i> , $z = 7$, $\kappa\rho = 90^\circ$
2. Фрезерувати приливи та технологічні бази (8 пов.)	<i>CoroMill® Plura</i> $\varnothing 12$ мм, [45] <i>R216.24 – 12050BCC19P</i>

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

1	2
3. Контурне фрезерування 11-ти бобишок	<i>CoroMill® Plura</i> Ø10 мм, [45] <i>R216.24 – 10050BCC16P</i>
010 Горизонтально-фрезерна-розточувальна з ЧПК	
1. Розточити отвір Ø128,8 (IT8) та Ø118	Борштанга <i>CoroBore®</i> 825, [38] касета 825C – TC09U – BW пластина <i>TPGH 09T304 (H13A)</i>
2. Прецизійне розточування посадкових отворів	Борштанга <i>CoroBore®</i> 825, [38] касета 825C – TC09U – BW <i>TPGH 09T308 (H10)</i> для Ø120H8 <i>TPGH 09T312 (H10)</i> для Ø130H8
3. Свердлити та розгорнути 2 технологічні отвори	<i>CoroDrill®</i> 860, [40] 860.1 – 1080 – 054A1 для Ø10,8 мм <i>CoroReamer®</i> 835, [46] 835 – 1100 – H6 – A – 1024 – C для Ø11H8
4. Підрізати поверхні 2, 4, 7 та розточити фаску 1	<i>CoroMill®</i> 490, [37] <i>490-050C5-08M</i> , пластини <i>E-NL (H13A)</i>
5. Розточити поверхні 6 та 3 послідовно	
6. Підрізати торець (поверхня 5)	
015 Вертикально-свердлильна з ЧПК	
1. Свердлити та зенкувати 16 отворів	<i>CoroDrill®</i> 430 – NM, [38] 430.4 – 1100 – NM
2. Свердлити 12 отворів під різьбу M10	<i>CoroDrill®</i> 860 – NM, [40] 860.1 – 0850 – 043A1 – NM
3. Свердління 8 отворів під різьбу M8	<i>CoroDrill®</i> 860 – NM, [40] 860.1 – 0670 – 034A1 – NM
4. Свердління 3 отворів під різьбу M6	<i>CoroDrill®</i> 860 – NM, [40] 860.1 – 0500 – 025A1 – NM
5. Свердління 4 отворів Ø11,2	<i>CoroDrill®</i> 860 – NM, [40] 860.1 – 1120 – 034A1 – NM
6. Свердління 1 отвору Ø17	<i>CoroDrill®</i> 860 – NM, [40] 860.1 – 1700 – 051A1 – NM
7. Свердління 1 отвору Ø19	<i>CoroDrill®</i> 860 – NM, [40] 860.1 – 1900 – 057A1 – NM
8. Цекування бобишок (11 поверхонь) Ø13	<i>CoroMill®</i> 316, [41] 316 – 13SM345 – 13000A – H10F
9. Нарізання різьби M10	<i>CoroTap®</i> 300, [47] T300 – NM101DB – M10X125
10. Нарізання різьби M8	<i>CoroTap®</i> 300, [47] T300 – NM101DB – M8X100
11. Нарізання різьби M6	<i>CoroTap®</i> 300, [47] T300 – NM101DB – M6X100

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк. 31
-----	------	----------	--------	------	--------------------------------	------------

1	2
12. Нарізання конічної різьби NPT 1/4-18	<i>CoroTap® 300, [47] T300 – NM100DT – 1/4</i>
13. Нарізання конічної різьби NPT 1/8-27	<i>CoroTap® 300, [47] T300 – NM100DT – 1/8</i>
14. Механізоване зачищення поверхонь	<i>CoroMill® Plura, [44] 2P350 – 1000 – OA – H10F</i>
020 Радіально-свердлильна	
1. Свердлити 2 отвори Ø9, 3 ^{+0,15} та зенкувати фаски 1 × 45°	<i>Walter Titex DC170 Supreme, [49] DC170 – 05 – 09.300A1 – WJ30EJ</i>
2. Свердлити 3 отвори Ø11 ^{+0,43} та зенкувати фаски 0,6 × 45°	<i>Walter Titex DC170 Supreme, [49] DC170 – 05 – 11.000A1 – WJ30EJ</i>
025 Горизонтально-свердлильна-розточувальна з ЧПК	
1. Свердлити отвір Ø24	<i>CoroDrill® 860 – NM, [40] 860.1 – 2400 – 072A1 – NM</i>
2. Розгорнути отвір Ø24	<i>CoroReamer® 835, [46] 835.B – 2400 – A1 – PF</i>
3. Свердлити отвір Ø18	<i>CoroDrill® 860 – NM, [40] 860.1 – 1800 – 072A1 – NM</i>
4. Розгорнути отвір Ø18	<i>CoroReamer® 835, [46] 835.B – 1800 – A1 – PF</i>
5. Зенкувати 2 отвори Ø46 (поверхня 1, 2)	<i>CoroMill® 390, [42] R390 – 044C4 – 11M</i>
6. Розточити 2 отвори Ø46,2	<i>CoroBore® 825, [38] A32 – R825B – AF23ST</i>

Запропонований інструментальний набір сформовано на основі геометричної адаптації до алюмінію, інтенсифікації переходів, прецизійного регулювання та ефективного відведення стружки. Це забезпечує баланс між точністю, продуктивністю і надійністю процесу.

2.3 Обґрунтування та призначення контрольно-вимірювальних інструментів

Для забезпечення стабільності геометричних параметрів деталі «Картер коробки передач 26.11 Ж2» у середньосерійному виробництві з річною програмою 2000 одиниць необхідно застосувати об'єктивний автоматизований

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

контроль. Традиційні методи, що ґрунтуються на ручних вимірювальних інструментах чи візуальній перевірці, не гарантують потрібної точності та відтворюваності, особливо при контролі складних просторових розмірів, відхилень форми та взаємного розташування поверхонь. Найбільш ефективним рішенням є використання координатно вимірювальної машини *Hexagon Global*, яка інтегрується у проєктний технологічний процес і забезпечує фінальну перевірку якості на операції 035.

Для фінального контролю картера застосовується координатно вимірювальна машина *GLOBAL Silver SF 7.10.7* виробництва Hexagon [35]. Вона має робочий об'єм 700 × 1000 × 700 мм, забезпечує точність вимірювань на рівні $\pm 2,0$ мкм та оснащується сканувальною головою *Leitz LSP X1*. Завдяки системі структурної термокомпенсації машина здатна працювати безпосередньо у виробничому приміщенні в діапазоні температур від 15 до 30 °C, що дозволяє уникнути потреби у спеціальних метрологічних умовах. Програмне забезпечення PC DMIS забезпечує імпорт CAD моделі картера, автоматичне створення програми контролю та формування кольорової карти відхилень. Така інтеграція дозволяє поєднати точність вимірювань із цифровою прозорістю процесу, створюючи основу для формування цифрового двійника деталі та підвищення стабільності виробництва.

На операції 030 контролюються лінійні розміри, отвори різних діаметрів, площинність, перпендикулярність, паралельність, позиційні допуски та шорсткість поверхонь. Для цього застосовуються тактильні зонди, сканувальні головки, переносний профілометр та різьбові калібри. Організація контролю передбачає стовідсоткову перевірку критичних параметрів і вибірковий контроль інших розмірів із періодичністю десять відсотків партії. Час вимірювання однієї деталі скорочується до п'яти семи хвилин замість п'ятнадцяти двадцяти хвилин при ручному контролі, а результати автоматично фіксуються у протоколі з висновком про придатність та кольоровою картою відхилень.

Застосування координатно вимірювальної машини *Hexagon Global* у складі технологічного процесу гарантує відповідність геометричних параметрів картера вимогам креслення, забезпечує стабільність якості в межах партії,

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		33

дозволяє виконати контроль складних просторових допусків, скорочує трудомісткість операцій у кілька разів і створює основу для цифрової інтеграції виробництва.

2.4 Верстатне забезпечення процесу обробки

Для виконання операції 005 «Вертикально-фрезерна з ЧПК» використовується обробний центр *DMG MORI CMX 800 V*. Його робочі ходи становлять $X = 800$ мм, $Y = 560$ мм, $Z = 510$ мм, а точність позиціонування сягає 6 мкм, що забезпечує необхідну жорсткість та стабільність процесу при обробленні відповідальних поверхонь [32]. Конструкція верстата передбачає магазин інструментів місткістю тридцять позицій із конусом *SK 40* та максимальною довжиною інструменту 300 мм. Така конфігурація дозволяє виконати повний комплекс фрезерних переходів: чорнове, напівчистове та чистове фрезерування площин, приливів і бобишок за один установа без потреби у ручній зміні інструменту. Це значно скорочує час підготовки та підвищує продуктивність, зменшуючи ризик похибок, пов'язаних із людським фактором.

Для виконання операцій 010 «Горизонтально-фрезерно-розточувальна з ЧПК» та 025 «Горизонтально-свердлильна-розточувальна з ЧПК» використовується обробний центр *DMG MORI NHX 4000*. Його робочі переміщення становлять $X = 560$ мм, $Y = 560$ мм, $Z = 660$ мм, а точність позиціонування 6 мкм згідно *ISO 230 2*, що гарантує стабільне забезпечення допусків *IT6 – IT7* при розточуванні відповідальних отворів $\varnothing 130H8$, $\varnothing 120H8$ та $\varnothing 46.2H7$ [33]. Верстат оснащений шпинделем *speedMASTER* з частотою обертання 15 000 об/хв, потужністю 22 кВт та крутним моментом 111 Нм, що дозволяє ефективно виконувати чорнове та чистове розточування алюмінієвого сплаву *AK5M7*. Також верстат має магазин інструментів місткістю 40 позицій з можливістю розширення до шістдесяти або ста вісімдесяти, із конусом *SK 40* та максимальною довжиною інструменту 550 мм, що дозволяє сконцентрувати всі необхідні розточувальні, свердлильні та розгортувальні переходи. Поворотний стіл з прямим приводом *DDM®* частотою обертання 100 об/хв та індексацією

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

0,001° забезпечує доступ до отворів у різних площинах без переустановлення деталі.

Для виконання операції 015 «Вертикально свердлильна з ЧПК» використовується обробний центр *Doosan DNM 4000*. Це компактна модель, яка створена для високопродуктивної роботи в умовах обмеженого виробничого простору [34]. Робочі ходи верстата становлять $X = 520$ мм, $Y = 400$ мм, $Z = 480$ мм, розмір столу дорівнює 650×400 мм. Верстат оснащений шпинделем з безпосереднім приводом, що працює на частоті обертання 12 000 об/хв при потужності 18,5 кВт та крутному моменті 117,8 Н·м. Магазин інструментів місткістю 20 позицій скорочує час зміни інструменту та підвищує загальну продуктивність. Верстат комплектується системою ЧПК *Fanuc i Series* з пакетом *EOP (Easy Operation Package)*, який включає функції адаптивного керування, моніторинг навантаження інструменту та швидке переналагодження.

Для виконання операції 020 «Радіально свердлильна» використовується універсальний радіально свердлильний верстат 2M55, створений на Одеському заводі радіально-свердлильних верстатів. Це обладнання призначене для свердління, розсвердлювання, зенкерування, розгортання, розточування отворів та нарізання різьби в корпусних деталях. Верстат має найбільший діаметр свердління у Сталі 45 до 50 мм, у чавуні до 70 мм, оснащений шпинделем з конусом Морзе №5 та забезпечує виліт шпинделя від 375 до 1600 мм. Відстань від торця шпинделя до плити становить 450 – 1600 мм, а хід шпинделя сягає 350 – 400 мм. Діапазон частот обертання охоплює 20 – 2000 об/хв. Потужність головного приводу становить 4,0 – 4,5 кВт. Верстат оснащений гідравлічними затискачами колони, що гарантує стабільність у робочому положенні, а фрикційна муфта в коробці швидкостей забезпечує швидкий реверс при нарізанні різьби та захист від перевантажень.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

2.5 Розрахунок режимів різання для технологічної операції

Розрахунок режимів різання виконано для усіх переходів проектного технологічного процесу. При цьому враховано, що в якості матеріалу для деталі «Картер коробки передач 26.11 Ж2» використовується алюмінієвий сплав АК5М7 із твердістю HB 80...82, призначені попередньо інструменти були приведені в табл. 2.3. Також раніше, в п. 2.4. ми вибрали моделі верстатів та навели їх основні характеристики.

Метою приведеного нижче розрахунку є визначення оптимальних швидкостей різання, частот обертання шпинделя, подач, сил різання та основного часу обробки.

Для розрахунку використовується загальновідома методика, що базується на типових аналітичних залежностях [19, 24]. Оскільки для обробки ми використовуємо весь інструмент компанії Sandvik Coromant, то значення швидкості різання v приймаємо за їх рекомендаціями. Для алюмінієвих сплавів при фрезеруванні рекомендоване значення швидкості різання буде в межах 400 ... 800 м/хв, для свердління (200 ... 400 м/хв), для розточування (300 ... 600 м/хв), а для розгортання (50 ... 100 м/хв).

При цьому частота обертання шпинделя n буде розраховуватись за формулою:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} \quad (2.1)$$

та узгоджуватись з паспортними даними обраного обладнання.

Подачу на оберт S_0 будемо приймати згідно з рекомендаціями виробника інструменту [48].

Силу різання P_z будемо знаходили за емпіричними залежностями, які приведені в рекомендованій літературі [19, 24], звідти будемо приймати і значення вагових коефіцієнтів.

Для токарних операцій силу P_z визначаємо за виразом:

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_0^y \cdot V_d^n \cdot K_r \quad (2.2)$$

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Для фрезерних операцій скористаємось виразом:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot Z}{D^q \cdot n^w} \cdot K_p \quad (2.3)$$

Для свердлильних операцій:

$$P_0 = 10 \cdot C_p \cdot D^q \cdot s^y \cdot K_p \quad (2.4)$$

При розрахунку основного часу T_0 скористаємось залежністю:

$$T_0 = \frac{L}{S_0 \cdot n} \quad (2.5)$$

де L – довжина робочого ходу.

Отримані результати розрахунків зведемо у таблицю 2.4, в ній відображаються режими різання та основні параметри для кожного технологічного переходу.

Для фрезерних операцій, які містять кілька переходів, подача наведена як подача на оберт, перерахована з подачі на зуб з урахуванням кількості зубів та частоти обертання. Сила різання подана як сумарна осьова.

Для різьбонарізних переходів силу не визначали, оскільки вона не впливає на вибір потужності приводу.

Основний час у цих випадках розраховано за формулою:

$$T_0 = L / (n \cdot P) \quad (2.6)$$

де P – величина кроку різьби.

Якщо технологічний перехід передбачав обробку кількох отворів чи поверхонь, то в таблиці час наведено сумарно для всієї групи.

Таблиця 2.4 – Вибір режимів різання

№ переходу	Глибина t , мм	Подача S_0 , мм/об	Швидкість V , м/хв	Частота n , об/хв	Сила P_z , Н	Основний час T_0 , хв
1	2	3	4	5	6	7
005-1	1,6	0,5 (на зуб)	600	2000	1238	0,22
005-2	2	0,2 (на зуб)	500	12000	810	0,63
005-3	2	0,2 (на зуб)	500	12000	810	
010-1	1,5	0,2	500	1200	850	1,62
010-2	0,5	0,1	400	1000	420	2,6
010-3	5,4	0,15	300	8000	385	0,076

продовження таблиці 2.4

1	2	3	4	5	6	7
010-4	0,1	0,5	80	2000	195	0,09
010-5	2	0,12 (на зуб)	600	4000	480	0,17
010-6	2	0,12 (на зуб)	600	4000	480	0,68
010-7	2	0,12 (на зуб)	600	4000	480	0,125
015-1	5,5	0,2	300	8000	420	0,30
015-2	4,25	0,2	300	10000	380	0,15
015-3	3,35	0,2	300	10000	360	0,08
015-4	2,5	0,2	300	10000	340	0,03
015-5	5,6	0,2	300	8000	425	0,04
015-6	8,5	0,2	300	5000	520	0,02
015-7	9,5	0,2	300	5000	550	0,02
015-8	1,5	0,1	200	5000	310	0,12
015-9	–	1,25	15	480	–	0,44
015-10	–	1	15	600	–	0,18
015-11	–	1	15	800	–	0,06
015-12	–	1,41	12	400	–	0,08
015-13	–	1,41	12	550	–	0,07
015-14	–	–	–	–	–	0,2
020-1	4,65	0,15	117	4000	360	0,083
020-2	5,5	0,15	138	4000	385	0,125
025-1	12	0,2	300	4000	650	0,0625
025-2	0,2	0,5	80	1000	280	0,1
025-3	9	0,2	300	5000	540	0,05
025-4	0,2	0,5	80	1400	260	0,07
025-5	2	0,2 (на зуб)	300	2000	620	0,12
025-6	0,5	0,1	400	2800	420	0,4
Всього:						9,00

Згідно з проведеними розрахунками сумарний основний час обробки однієї деталі за проектним технологічним процесом становить 9 хвилин. У базовому варіанті тривалість обробки перевищувала 100 хвилин. Це означає, що продуктивність виробництва зросла більш ніж у десять разів.

Досягнутий результат пояснюється кількома чинниками. Концентрація операцій дала змогу скоротити їхню кількість із тридцяти п'яти до шести. Використання сучасних обробних центрів з ЧПК забезпечило високу точність позиціонування та стабільність процесу. Комбінований інструмент дозволив виконувати кілька переходів за один робочий хід і значно зменшив допоміжний час.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

2.6 Висновки до 2 розділу

Аналіз і розробка технологічного процесу показали, що перехід від базового маршруту до проєктного варіанта забезпечує суттєве підвищення ефективності виробництва. Кількість операцій скорочено більш ніж утричі завдяки інтеграції переходів у багатофункціональні обробні центри, що дозволяє мінімізувати ручні переустановки та знизити вплив людського фактора. Використання сучасних верстатів із ЧПК (DMG MORI CMX 800V, NHX 4000, Doosan DNM 4000) забезпечує стабільність точності в межах IT6 – IT7, високу продуктивність та можливість автоматизованого контролю параметрів.

Вибір ріжучого інструменту здійснено з урахуванням особливостей алюмінієвого сплаву АК5М7, його в'язкості та схильності до налипання на ріжучу кромку. Застосування інструментів серій *NM*, *CoroDrill®*, *CoroBore®* та *Walter DC170 Supreme* гарантує стабільне стружкоутворення, якісну поверхню та довговічність інструменту. Важливим рішенням стало використання внутрішнього підведення охолоджувальної рідини, що забезпечує ефективне відведення тепла та запобігає поломкам при обробці глибоких отворів.

Контроль геометричних параметрів інтегровано у виробничий процес за допомогою координатно-вимірювальної машини *Hexagon Global*. Це дозволяє виконувати високоточні вимірювання у виробничих умовах, скорочує час контролю та забезпечує цифрову інтеграцію даних, що підвищує прозорість і стабільність виробництва.

Верстатне забезпечення процесу відповідає сучасним вимогам енергоефективності та точності. Використання обробних центрів із широким діапазоном швидкостей і потужностей створює умови для комплексної обробки корпусної деталі без додаткових переустановок. Збереження у структурі процесу верстата 2М55 для локальних операцій є економічно виправданим і дозволяє оптимально поєднати нове обладнання з наявними ресурсами.

Розрахунок режимів різання підтвердив можливість досягнення оптимальних швидкостей, подач і сил різання для алюмінієвого сплаву АК5М7. Це забезпечує баланс між продуктивністю та якістю, а також гарантує стабільність параметрів у межах серійного випуску.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		39

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок та обґрунтування параметрів приводу головного руху

3.1.1 Вибір та обґрунтування структурно-кінематичної схеми верстата

Визначившись із необхідним набором формоутворюючих рухів, які повинен забезпечити вертикально-свердлильний верстат під час виконання операції 020, перейдемо до розробки його структурно-кінематичної схеми. Така схема відображає взаємозв'язок основних механізмів і дає змогу простежити послідовність передачі рухів від джерела енергії до робочого інструмента. В якості базової моделі прийнято верстат 2М55, компонування якого передбачає наявність чотирьох кінематичних ланцюгів. Їхня взаємодія формує повний цикл роботи обладнання, забезпечуючи узгодженість головного руху, подачі, вертикального переміщення рукава та точне позиціонування свердлильної головки. Саме така структурна організація створює передумови для досягнення необхідної точності та продуктивності процесу свердління.

На рис. 3.1 приведена структурно-кінематична схема проєктованого свердлильного верстату.

Кінематичний ланцюг головного руху (привід шпинделя). Зовнішній кінематичний зв'язок визначається парою «вал електродвигуна – коробка швидкостей». Внутрішній зв'язок формує взаємодію шпинделя з опорами. Умова погодження рухів полягає у забезпеченні заданої частоти обертання шпинделя залежно від положення перемикачів коробки швидкостей та частоти обертання двигуна. Рівняння кінематичного балансу має вигляд:

$$n_{\text{шп}} = n_{\text{дв}} \cdot i_{\text{кш}}, \quad (3.1)$$

де $n_{\text{шп}}$ – частота обертання шпинделя, об/хв; $n_{\text{дв}}$ – частота обертання електродвигуна, об/хв; $i_{\text{кш}}$ – передавальне відношення коробки швидкостей.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Вальчишин В.</i>			КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	<i>Лист.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Склярів Р.А.</i>					40	31
<i>Реценз.</i>						<i>ТНТУ ім. І. Пулюя зр. МВ-41, м. Тернопіль</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Кобельник В. Р.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Крцпа В.В.</i>						

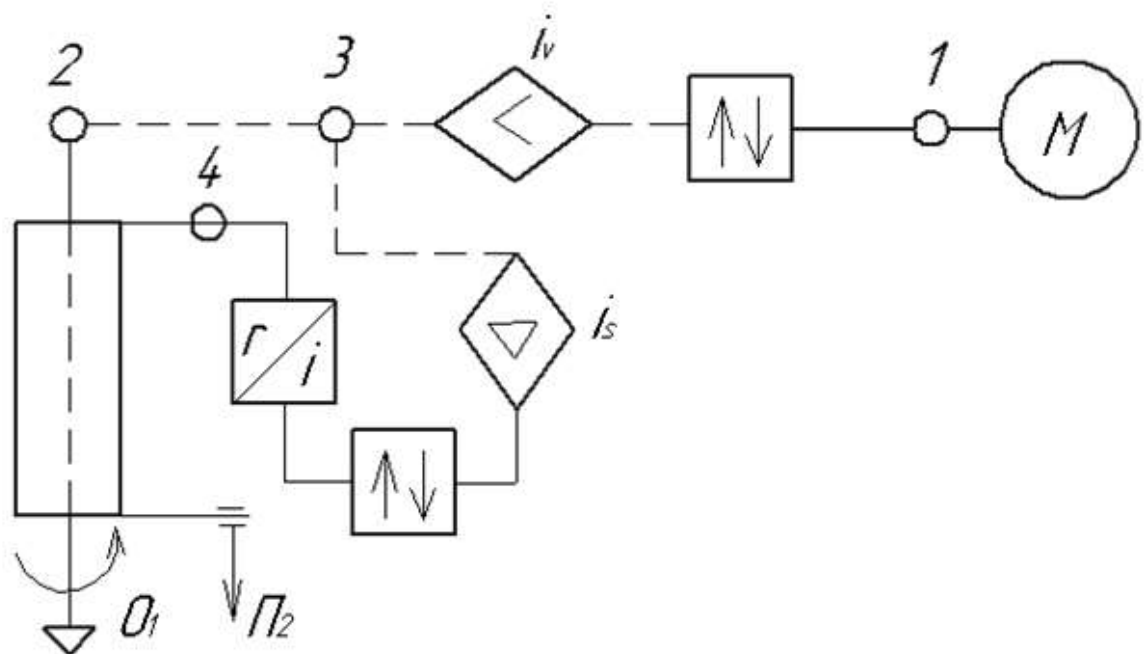


Рисунок 3.1 – Структурно-кінематична схема приводу проєктованого верстату

Кінематичний ланцюг головного руху (привід шпинделя). Зовнішній кінематичний зв'язок визначається парою «вал електродвигуна – коробка швидкостей». Внутрішній зв'язок формує взаємодію шпинделя з опорами. Умова погодження рухів полягає у забезпеченні заданої частоти обертання шпинделя залежно від положення перемикачів коробки швидкостей та частоти обертання двигуна. Рівняння кінематичного балансу має вигляд:

$$n_{\text{шп}} = n_{\text{дв}} \cdot i_{\text{КШ}}, \quad (3.1)$$

де $n_{\text{шп}}$ – частота обертання шпинделя, об/хв;

$n_{\text{дв}}$ – частота обертання електродвигуна, об/хв;

$i_{\text{КШ}}$ – передавальне відношення коробки швидкостей.

Кінематичний ланцюг механізму подач. Зовнішній кінематичний зв'язок визначається системою «вал електродвигуна – коробка подач». Внутрішній зв'язок реалізується через пару «піноль – патрон інструмент». Узгодження рухів забезпечує відповідність подачі на один оберт шпинделя з кінематикою механізму подач. Рівняння кінематичного балансу має вигляд:

$$s_0 = s_{\text{дв}} \cdot i_{\text{КП}} \quad (3.2)$$

де s_0 – подача на один оберт шпинделя, мм/об;

$s_{дв}$ – подача на виході привода (рух від ходового гвинта чи вала), мм/об;

$i_{КП}$ – передавальне відношення коробки подач.

Кінематичний ланцюг вертикального переміщення рукава. Зовнішній кінематичний зв'язок визначається парою «електродвигун – гвинт (або рейка) механізму підйому». Внутрішній зв'язок формує систему «рукав – напрямні колони». Умова погодження рухів полягає у забезпеченні необхідної швидкості підйому та фіксації рукава. Рівняння кінематичного балансу має вигляд:

$$v_{рук} = n_{дв.рук} \cdot t_{гв}, \quad (3.3)$$

де $v_{рук}$ – швидкість підйому рукава, мм/хв;

$n_{дв.рук}$ – частота обертання двигуна підйому рукава, об/хв;

$t_{гв}$ – крок ходового гвинта механізму підйому, мм.

Кінематичний ланцюг переміщення свердлильної головки по рукаву. Зовнішній кінематичний зв'язок реалізується через ручне переміщення штурвалом або допоміжний двигун, що діє на зубчасту рейку чи гвинт. Внутрішній зв'язок визначається парою «свердлильна головка – напрямні рукава». Умова погодження рухів полягає у плавності переміщення та фіксації в заданому положенні. Рівняння кінематичного балансу має вигляд:

$$L_{гол} = \Delta\varphi_{шт} \cdot \frac{p_r}{2 \cdot \pi}, \quad (3.4)$$

де $L_{гол}$ – лінійне переміщення свердлильної головки по рукаву, мм;

$\Delta\varphi_{шт}$ – кут повороту штурвала керування (чи вихідного вала привода), рад;

p_r – крок зубчастої рейки (або гвинта), мм.

3.1.2 Загальна компоновка і принцип дії верстата

Заготовку встановлюють на фундаментній плиті 1 (рис. 3.2) або приставному столі 2. У цоколі плити змонтована обертова колона 3, по якій переміщується рукав 4 за допомогою механізму підйому 5. Свердлильна головка 6 з коробкою швидкостей і коробкою подач рухається по напрямних рукава

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

вручну. Положення інструмента відносно деталі регулюють поворотом рукава та переміщенням головки.

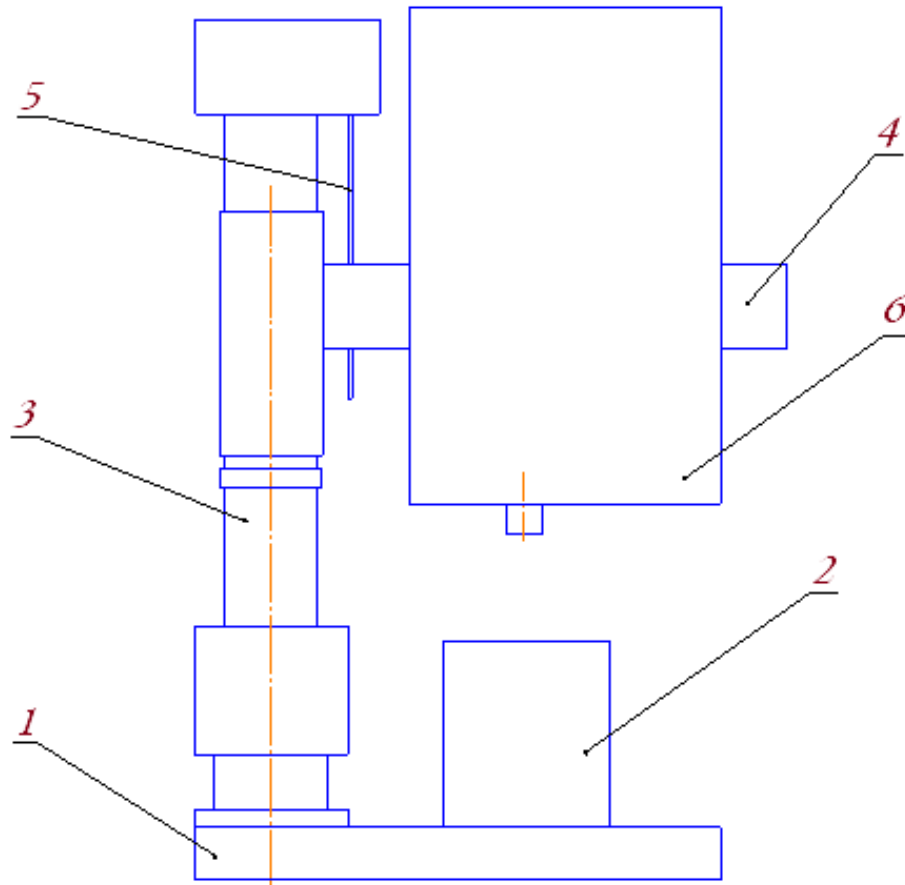


Рисунок 3.2 – Компонувальна схема радіально-свердлильного верстата

Верстат оснащений преселективним керуванням частот обертання і подач, що забезпечує точність та зручність налаштувань. Фундаментна плита виконує роль бази, на якій закріплені всі основні вузли. Колона слугує опорою для рукава, який може обертатися навколо осі та переміщуватися вертикально. Рукав є несучим елементом для свердлильної головки. Коробка швидкостей і коробка подач забезпечують робочі подачі та швидкі переміщення, що оптимізує процес свердління.

Компоувальна схема радіально-свердлильного верстата відображає взаємозв'язок основних конструктивних елементів і принцип їхньої роботи, забезпечуючи універсальність, точність та продуктивність технологічного процесу.

3.1.3 Розрахунок діапазону регулювання

В якості базової моделі для нашої кваліфікаційної роботи прийнято універсальний радіально-свердлильний верстат моделі 2М55. Він призначений для обробки різних матеріалів, від конструкційних сталей до легких сплавів, і допускає використання інструментів діаметром до 50 мм при роботі зі сталлю та до 70 мм при обробці чавуну. Штатний привод верстату забезпечує частоти обертання шпинделя в межах $20 \div 2000$ об/хв при номінальній вхідній частоті двигуна 1500 об/хв.

При розрахунку приводу верстату спочатку слід визначити діапазон регулювання частоти обертання шпинделя, для цього слід скористатись виразом:

$$R_n = \frac{n_{max}}{n_{min}} \quad (3.5)$$

де n_{max} – позначає максимальну частоту обертання шпинделя, об/хв;

n_{min} – позначає мінімальну частоту обертання шпинделя, об/хв.

Для базової моделі верстату діапазон регулювання частоти буде становити:

$$R_n = \frac{2000}{20} = 100$$

Для розширення технологічних можливостей, особливо при свердлінні отворів малого діаметра у легких сплавах, необхідно збільшити верхню межу частоти обертання шпинделя. Як було показано в п.2.2 при використанні твердосплавних інструментів компанії *Supreme (Walter)* для обробки алюмінію, верстат повинен забезпечити швидкості в діапазоні $100 \div 150$ м/хв. Це означає, що при діаметрі свердла 11 мм потрібна частота обертання близько 4000 об/хв.

Коробка швидкостей базової моделі має максимальне передаточне відношення:

$$i_{max} = \frac{2000}{1500} = 1,333$$

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Щоб отримати на шпинделі 4000 об/хв, необхідна вхідна частота:

$$n_{\text{вх}} = \frac{4000}{1,333} \approx 3000 \text{ об/хв.}$$

Таким чином двигун повинен працювати на частоті 3000 об/хв хвилину, що відповідає двополюсному виконанню. Водночас для забезпечення низьких швидкостей, необхідних при обробці великих діаметрів у сталі, доцільно зберегти можливість роботи на менших частотах. Найбільш раціональним рішенням є використання двошвидкісного асинхронного двигуна з частотами 1500 та 3000 об/хв, що реалізується завдяки перемиканню полюсів.

У результаті отримуємо два діапазони частот шпинделя. При 1500 об/хв діапазон буде становити від 20 ÷ 2000 об, що відповідає штатним характеристикам. При частоті обертів двигуна 3000 об/хв шпиндель може розвивати швидкість від 40 до 4000 обертів.

Тоді загальний діапазон регулювання після модернізації буде становити:

$$R_n = \frac{4000}{20} = 200$$

Кількість ступенів у кожному діапазоні залишається незмінною, оскільки конструкція коробки швидкостей не змінюється. Часткове перекриття діапазонів створює гнучкість у виборі оптимальних режимів для різних матеріалів та інструментів.

При роботі зі сталлю застосовуються нижні діапазони, які забезпечують високий крутний момент і дозволяють виконувати свердління отворів великого діаметра. Для алюмінію та інших легких сплавів використовується верхній діапазон, що дає змогу досягти рекомендованих швидкостей різання навіть при малих діаметрах інструмента.

Отже вибір двошвидкісного асинхронного двигуна з максимальною частотою 3000 об/хв є технічно обґрунтованим. Він дозволяє суттєво розширити технологічні можливості верстата, зберігаючи його універсальність і не потребуючи конструктивних змін у коробці швидкостей. Отриманий діапазон регулювання $R_n = 200$ повністю відповідає вимогам проектного технологічного процесу та забезпечує необхідну продуктивність і точність.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		45

3.1.4 Структурна формула та структурна сітка приводу головного руху

Формування структури коробки швидкостей приводу головного руху здійснюється методами структурного аналізу. Вони дозволяють дослідити можливі варіанти побудови кінематичних ланцюгів і обґрунтувати вибір раціональної схеми. Одним із ключових інструментів є структурні сітки, що наочно відображають розподіл ступенів частот обертання та взаємозв'язки між групами передач.

Оптимальна схема визначається поетапно. Спершу встановлюється співвідношення між кількістю групових передач і числом передач у кожній групі з урахуванням прагнення до зменшення складності конструкції. Далі аналізується взаємне розташування груп у кінематичному ланцюзі. Перевага надається таким варіантам, де кількість передач у групах поступово зменшується у напрямку до вихідного вала, а їхні передатні характеристики відповідно зростають. Наступним кроком є відсів варіантів, що не відповідають допустимим значенням діапазонів регулювання або виходять за межі раціональних передатних відносин. Завершальний етап передбачає вибір структури, яка забезпечує мінімальні навантаження на проміжні вали завдяки підвищеним частотам обертання на початкових ділянках кінематичного ланцюга.

Для випадку загальної кількості ступенів частот обертання $z = 24$ можливі такі варіанти структурних формул:

$$z = 3(1) \cdot 2(3) \cdot 2(6) \cdot 2(12) = 24$$

$$z = 2(1) \cdot 3(2) \cdot 2(6) \cdot 2(12) = 24$$

$$z = 2(1) \cdot 2(2) \cdot 3(4) \cdot 2(12) = 24$$

$$z = 2(1) \cdot 2(2) \cdot 2(4) \cdot 3(8) = 24$$

$$z = 2(1) \cdot 3(2) \cdot 4(6) = 24$$

$$z = 4(1) \cdot 3(4) \cdot 2(12) = 24$$

Кожен із наведених варіантів відповідає множинній структурі, однак їх ефективність визначається не лише кількістю ступенів, а й розподілом

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

передатних відносин уздовж кінематичного ланцюга. Раціональним вважається варіант, у якому переборні групи формуються за принципом послідовного нарощування, що забезпечує рівномірне розширення діапазону частот обертання та спрощує конструкцію приводу.

На рис. 3.3 приведені зображення, які демонструють варіанти запропонованих формул у вигляді структурних сіток. Кожна схема відображає інший спосіб розподілу передатних відносин, що дозволяє оцінити їхню компактність і технологічність.

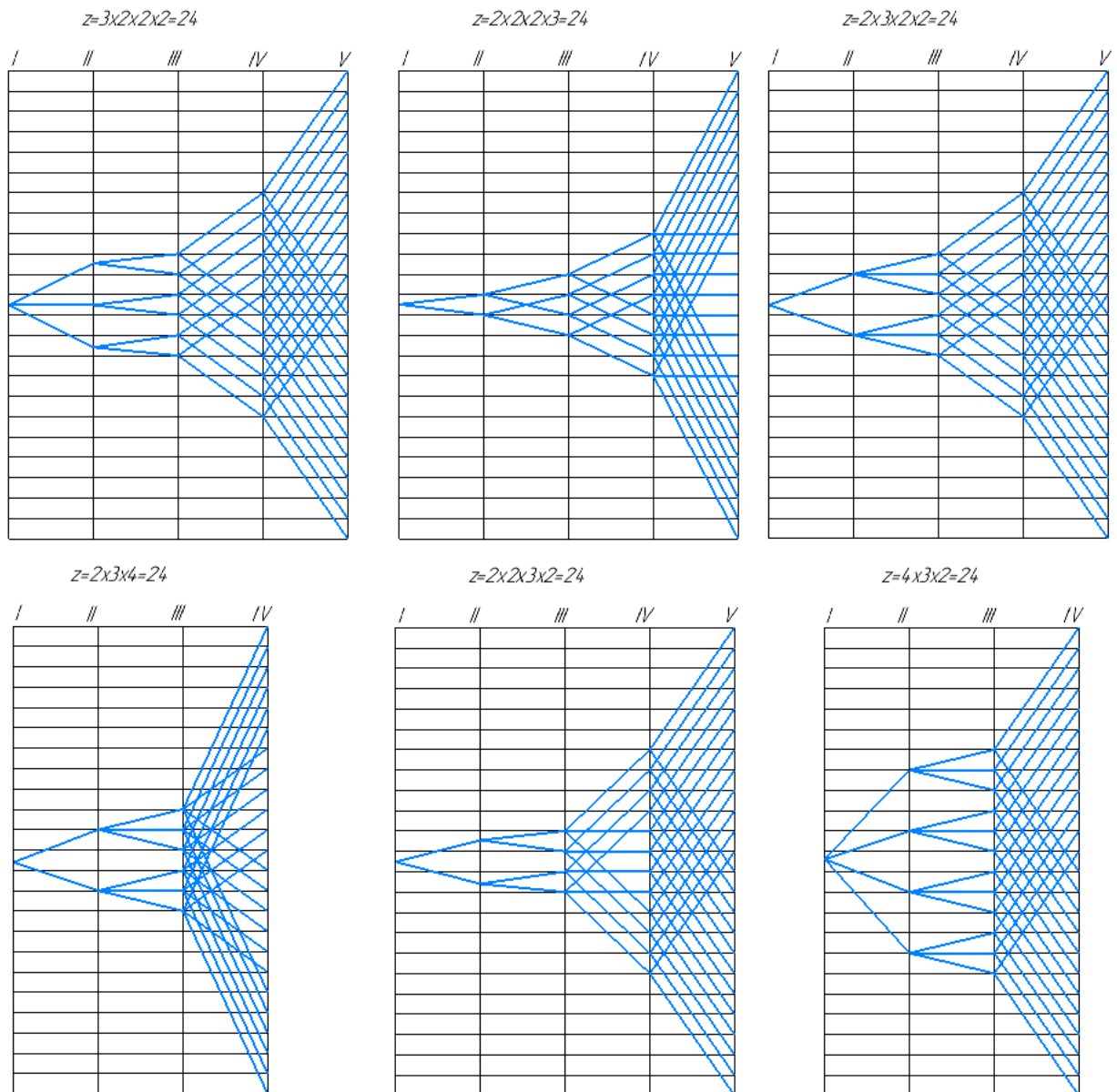


Рисунок 3.3 – Запропоновані варіанти структурних сіток для $z = 24$

Якщо не пред'являються особливі умови, то оптимальним варіантом буде:

$$24 = 1_{0^1} \cdot 2_{1^2} \cdot 3_{2^3} \cdot 2_{6^4} \cdot 2_{12^5}$$

Даний варіант сітки приведено на рис. 3.4.

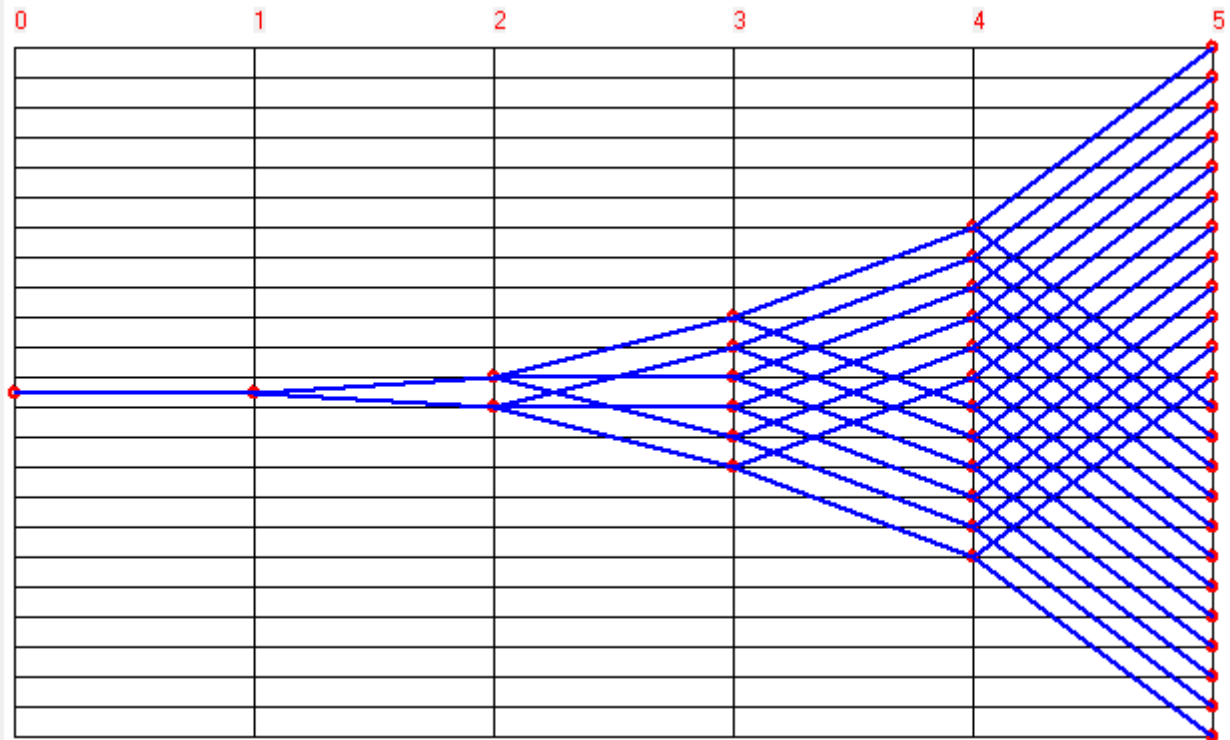


Рисунок 3.4 – Варіант оптимальної структурної сітки для $z = 24$

Число ступенів коробки швидкостей визначається за формулою [3]:

$$z = \frac{\lg R_n}{\lg \varphi} + 1 \quad (3.6)$$

де R_n – позначає діапазон регулювання частоти обертання шпинделя;

φ – знаменник геометричної прогресії ряду частот.

Для проєктованого свердлильного верстата приймаємо $\varphi = 1,26$. Для штатного діапазону регулювання $R_n = 100$ підставимо значення у формулу:

$$z = \frac{\lg 100}{\lg 1,26} + 1 = \frac{2}{0,1} + 1 = 21$$

Побудуємо структурну сітку з врахуванням того, що у нас кількість частот обертання шпинделя – 21 (див. рис. 3.5).

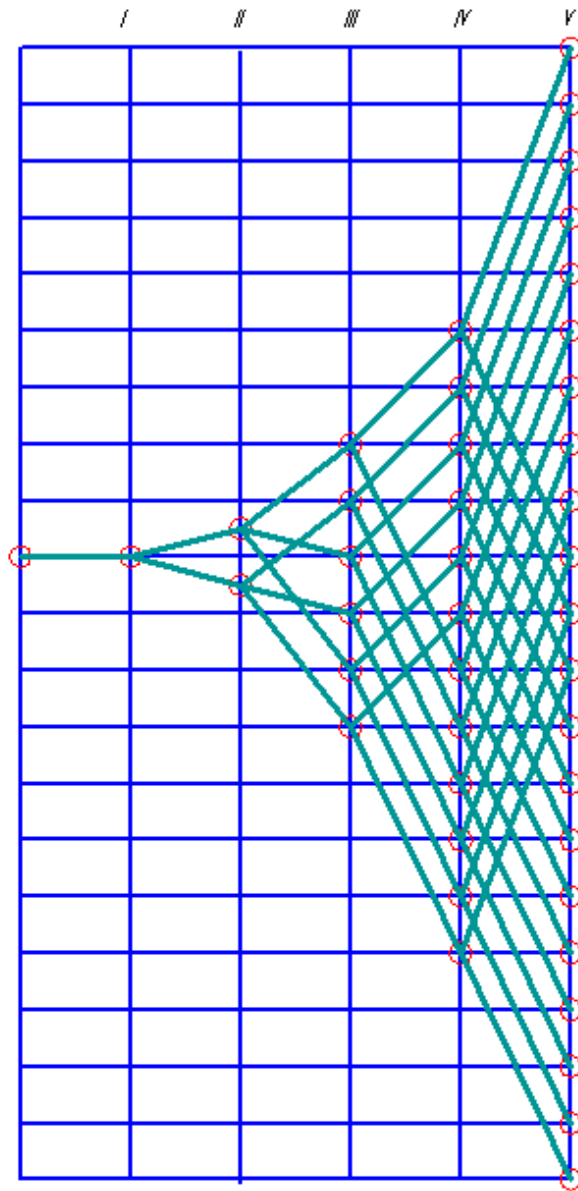


Рисунок 3.5 – Варіант структурної сітки для $z = 21$

Такій структурній сітці буде відповідати структурна формула:

$$21 = 1_{0^1} \cdot 2_{1^2} \cdot 3_{2^3} \cdot 2_{6^4} \cdot 2_{10^5}$$

Для даної структурної сітки розрахуємо проміжні значення частот обертання, для цього скористаємось виразом:

$$\begin{aligned} n_{min} &= n_1 \cdot k \\ n_i &= n_{i-1} \cdot \varphi \\ n_i &= n_1 \cdot k \cdot \varphi^{i-1} \end{aligned} \quad (3.7)$$

де, $n_1 = 20$ об/хв – мінімальна частота обертання для базового двигуна;

$\varphi = 1,26$ – знаменник геометричного ряду частот;

$k = \frac{n_{\text{дв}}}{1500}$ – коефіцієнт масштабування, що враховує частоту обертання двигуна.

Для двошвидкісного асинхронного двигуна маємо:

при $n_{\text{дв}} = 1500$ об/хв $\rightarrow k = 1$;

при $n_{\text{дв}} = 3000$ об/хв $\rightarrow k = 2$.

Результати розрахунків зводимо в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення частот шпинделя для різних швидкостей двигуна

Формула $n_i = n_1 \cdot k \cdot \varphi^{i-1}$	Синхронна частота обертання двигуна, $n_{\text{дв}}$	
	1500 об/хв ($k = 1$)	3000 об/хв ($k = 2$)
n_1	20	40
$n_2 = n_1 \cdot \varphi$	25	50
$n_3 = n_1 \cdot \varphi^2$	32	63
$n_4 = n_1 \cdot \varphi^3$	40	80
$n_5 = n_1 \cdot \varphi^4$	50	100
$n_6 = n_1 \cdot \varphi^5$	63	125
$n_7 = n_1 \cdot \varphi^6$	80	160
$n_8 = n_1 \cdot \varphi^7$	100	200
$n_9 = n_1 \cdot \varphi^8$	125	250
$n_{10} = n_1 \cdot \varphi^9$	160	315
$n_{11} = n_1 \cdot \varphi^{10}$	200	400
$n_{12} = n_1 \cdot \varphi^{11}$	250	500
$n_{13} = n_1 \cdot \varphi^{12}$	315	630
$n_{14} = n_1 \cdot \varphi^{13}$	400	800
$n_{15} = n_1 \cdot \varphi^{14}$	500	1000
$n_{16} = n_1 \cdot \varphi^{15}$	630	1250
$n_{17} = n_1 \cdot \varphi^{16}$	800	1600
$n_{18} = n_1 \cdot \varphi^{17}$	1000	2000
$n_{19} = n_1 \cdot \varphi^{18}$	1250	2500
$n_{20} = n_1 \cdot \varphi^{19}$	1600	3200
$n_{21} = n_1 \cdot \varphi^{20}$	2000	4000

3.1.5 Побудова графіка чисел обертів

Графік чисел обертів визначає реальні частоти всіх валів привода. Його складають відповідно до кінематичної схеми. Кожному валу відповідає вертикальна пряма. Горизонтальні лінії з рівними інтервалами позначають частоти обертання від мінімального до максимального значення.

Передача між двома валами показується променем, що сполучає відповідні відмітки. Якщо $i > 1$, промінь спрямований угору. Якщо $i < 1$, він іде вниз. При $i = 1$ лінія стає горизонтальною.

Визначаємо передаточне відношення для кожної групи передач [3].

Для розрахунків приймаємо знаменник ряду $\varphi = 1.26$, результати розрахунку приведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Передаточні відношення груп передач

Група	Передача і формула	Значення	Напрямок
<i>I</i>	$i_1 = 1/\varphi$	0.8	вниз
<i>II</i>	$i_2 = 1/\varphi$	0.8	вниз
	$i_3 = 1/\varphi^2$	0.63	вниз
<i>III</i>	$i_4 = 1/\varphi$	0.8	вниз
	$i_5 = 1/\varphi^3$	0.5	вниз
	$i_6 = 1/\varphi^5$	0.32	вниз
<i>IV</i>	$i_7 = \varphi^2$	1.6	вгору
	$i_8 = 1/\varphi^4$	0.4	вниз
<i>V</i>	$i_9 = \varphi^2$	1.6	вгору
	$i_{10} = 1/\varphi^7$	0.2	вниз

Приймаємо, що всі передачі мають один модуль і постійну міжосьову відстань. Для кожної групи визначаємо передаточне відношення та відповідні числа зубів. Аналітичні вирази та результати розрахунків за ними наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Розрахункові значення числа зубів зубчастих коліс

Група	Передача і формула	$Z_{\text{ведуче}}$	$Z_{\text{ведене}}$	ΣZ
I	$i_1 = \frac{z_1}{z_2} = \frac{4}{5}$	33	39	72
II	$i_2 = \frac{z_3}{z_4} = \frac{4}{5}$	29	39	68
	$i_3 = \frac{z_5}{z_6}$	33	35	68
III	$i_4 = \frac{z_7}{z_8}$	29	37	66
	$i_5 = \frac{z_9}{z_{10}}$	22	44	66
	$i_6 = \frac{z_{11}}{z_{12}}$	16	50	66
IV	$i_7 = \frac{z_{13}}{z_{14}}$	37	28	65
	$i_8 = \frac{z_{15}}{z_{16}}$	16	48	65
V	$i_9 = \frac{z_{17}}{z_{18}}$	48	30	78
	$i_{10} = \frac{z_{19}}{z_{20}}$	13	65	78

Графік частот обертання складається для визначення оптимальних значень передатних відносин усіх передач привода та реальних частот обертання його валів. Він базується на кінематичній схемі та розрахованих параметрах, наведених у таблицях 3.2 і 3.3.

У приводі застосовано двошвидкісний двигун із синхронними частотами 1500 та 3000 об/хв. Тому графік будується для двох діапазонів роботи.

Перший діапазон відповідає $n_{\text{дв}} = 1500$ об/хв ($k = 1$) і охоплює частоти шпинделя від 20 до 2000 об/хв. Другий діапазон відповідає $n_{\text{дв}} = 3000$ об/хв ($k = 2$) і охоплює частоти шпинделя від 40 до 4000 об/хв.

У кожному діапазоні частоти утворюють геометричний ряд зі знаменником $\varphi = 1,26$. Структура графіка залишається незмінною, його загальний вигляд приведено на рис. 3.6.

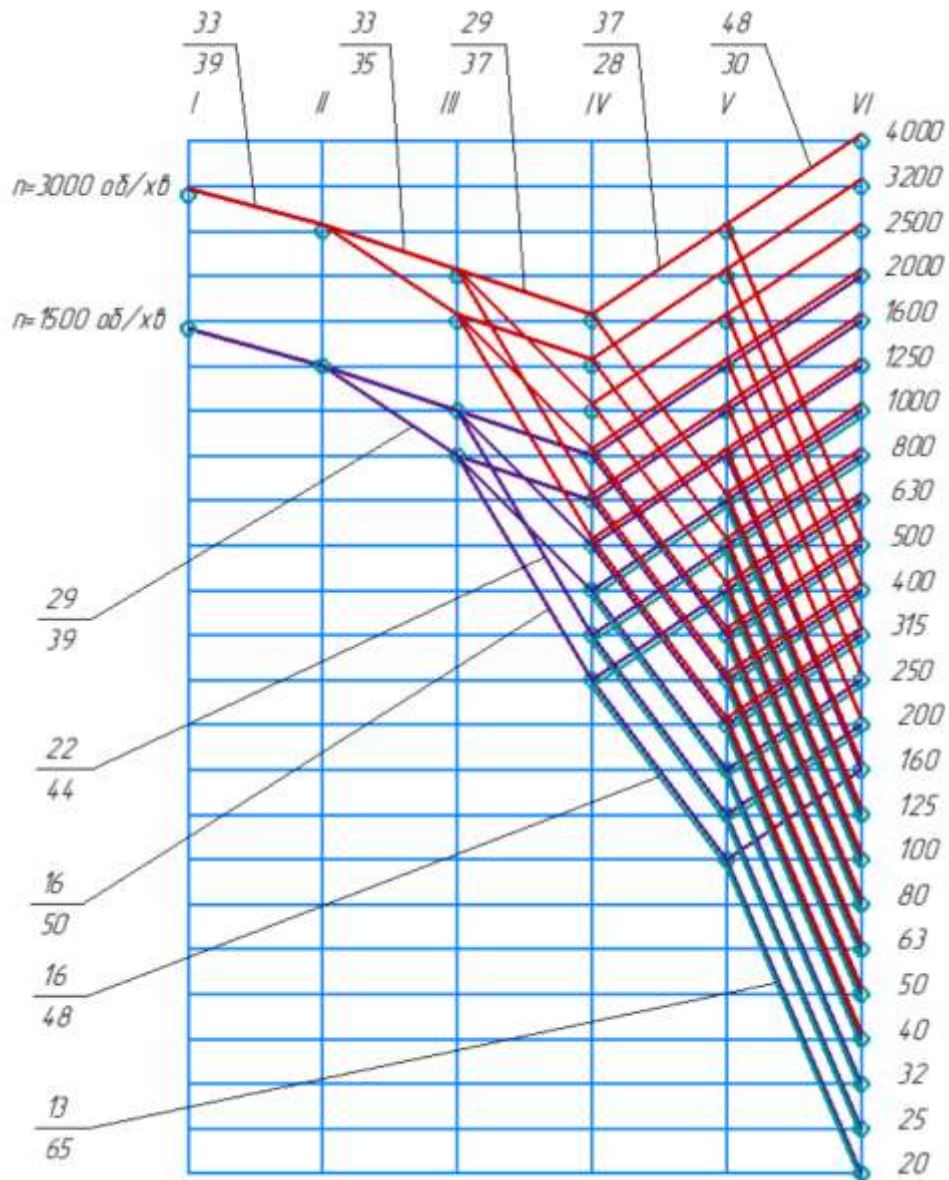


Рисунок 3.6 – Графік чисел обертів для проектованого приводу

3.1.6 Енергетичний розрахунок та вибір електродвигуна

Для перевірки потужності приводу в найважчих умовах обрано свердління отвору максимального діаметра $D = 50$ мм у важкооброблюваній легованій сталі 40Х з границею міцності $\sigma_b = 750$ МПа. Це найбільш навантажений режим для коробки швидкостей проектованого верстата. Для проведення обчислень застосовано методику представлену в роботі [24].

Так крутний момент при свердлінні можна визначити:

$$M_{кр} = 10 \cdot C_M \cdot D^q \cdot s^y \cdot k_p \quad (3.8)$$

де $C_M = 0.0345$; $q = 2.0$; $x_M = 0.8$, $k_p = 1.2$; $D = 50$ мм; $y = 0.8$;

$s = 0.5$ мм/об.

Підставляючи значення, отримуємо:

$$M_{кр} = 10 \cdot 0.0345 \cdot 50^2 \cdot 0.5^{0.8} \cdot 1.2 \approx 591 \text{ Н/м}$$

Рекомендована частота обертання шпинделя для свердла $\varnothing 50$ мм у такому матеріалі становить $n = 45 \div 63$ об/хв. Приймаємо $n = 50$ об/хв (нижній діапазон роботи верстата).

Для розрахунку потужність різання застосуємо вираз:

$$P_{різ} = \frac{M_{кр} \cdot n}{9550} \quad (3.9)$$

При штатній частоті обертання шпинделя $n = 1500$ об/хв отримаємо:

$$P_{різ} = \frac{591 \cdot 50}{9550} \approx 3.1 \text{ кВт}$$

При визначенні необхідної потужності електродвигуна слід врахувати загальний ККД кінематичного ланцюга $\eta = 0.85$ [3]:

$$P_{необ} = \frac{P_{різ}}{\eta} \quad (3.10)$$

Після підстановки отриманих попередніх розрахунків отримаємо:

$$P_{необ} = \frac{3.1}{0.85} \approx 3.65 \text{ кВт}$$

Для модернізації приводу верстата, що передбачає розширення діапазону частот обертання шпинделя до 4000 об/хв (швидкісна обробка алюмінію), замість базового одношвидкісного двигуна обрано двошвидкісний асинхронний електродвигун серії АІР132 S4/2 [2]. Його технічні характеристики наведено в табл. 3.4.

На першій ступені (1455 об/хв) двигун забезпечує 6.0 кВт, що відповідає штатному навантаженню верстата.

На другій ступені (2900 об/хв) потужність зростає до 7.1 кВт, створюючи необхідний запас для високошвидкісного свердління алюмінієвих сплавів.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		54

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики двигуна АІР132 S4/2

Параметр	Значення
Тип	АІР132 S4/2
Потужність $P_{\text{НОМ}}$, кВт	6.0 / 7.1
Синхронна частота, об/хв	1500 / 3000
Номінальна частота $n_{\text{НОМ}}$, об/хв	1455 / 2900
Напруга живлення, В	380
ККД, %	88 / 89
cosφ	0.84 / 0.89
Діаметр вала, мм	38

3.1.7 Побудова кінематичної схеми верстату

На основі проведених розрахунків та розробленої структурно-кінематичної схеми будуємо кінематичну схему верстата (див. рис. 3.7).

Як видно з представленої вище кінематичної схеми, шпindelь отримує обертання від двошвидкісного електродвигуна М1 типу АІР132S4/2 [2]. Залежно від схеми з'єднання обмоток двигун працює на двох фіксованих частотах, що відповідають 4 та 2 полюсам. Від двигуна М1 через муфту обертання передається на зубчасту пару 33/39, а від неї до коробки швидкостей. Коробка містить три подвійних блоки Б1, Б3, Б4 та один потрійний блок Б2, що необхідний діапазон частот обертання приводу.

Для з'єднання двигуна з валом коробки швидкостей застосовано сильфонну муфту з посадковими отворами 38 мм під вал коробки та 38 мм під вал двигуна.

При роботі на високому діапазоні $n_{\text{дв}} = 2900$ об/хв та використанні максимального передаточного відношення коробки швидкостей фактична частота шпинделя становить

$$n_{\text{шп.мак}} = 2900 \cdot \frac{33}{39} \cdot i_{\text{КШ(мак)}} = 3834 \approx 4000 \text{ об/хв}$$

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

3.2 Розробка конструкції приводу та його розрахунок

3.2.1 Розрахунок крутних моментів на валах приводу

Для оцінки навантаження елементів коробки швидкостей виконуємо розрахунок крутних моментів на кожному валу. Розрахунок проводимо для найбільш навантаженого режиму, коли двигун працює на нижній частоті обертання $n_{дв} = 1455$ об/хв при потужності $P = 6.0$ кВт. Саме в цьому діапазоні моменти на валах досягають максимальних значень.

Крутний момент на валу визначається за формулою [12]:

$$M_i = \frac{9550 \cdot N_i}{n_i} \quad (3.11)$$

де N_i – потужність на i -му валу, кВт;

n_i – частота обертання i -го вала, об/хв.

Потужність на кожному наступному валу визначається з урахуванням втрат [21]:

$$N_{i+1} = N_i \cdot \eta_{пер} \quad (3.12)$$

де $\eta_{пер}$ – ККД передачі на сусідніх валах.

В нашому випадку, коли ми маємо тільки зубчасті передачі та підшипники, величину $\eta_{пер}$ можна розрахувати:

$$\eta_{пер} = \eta_{зп} \cdot \eta_{п} \quad (3.13)$$

Для проведених розрахунків приймаємо:

$\eta_{зп} = 0.98$ – ККД зубчастої пари;

$\eta_{п} = 0.99$ – ККД пари підшипників.

Тоді величина сумарного ККД між сусідніми валами буде становити:

$$\eta_{пер} = 0.98 \cdot 0.99 \approx 0,97.$$

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Таким чином, на кожному етапі потужність зменшується, а момент розраховується вже для фактичного значення N_i .

Результати розрахунку наведено у табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати розрахунку потужності та крутних

Вал	Частота n , об/хв	Передаточне відношення i	Потужність N , кВт	Крутний момент M , Н·м
I (двигун)	1455	–	6.00	39.4
II (вхідний)	1230	$i_1 = \frac{33}{39} \approx 0.846$	5.82	45.2
III	915	$i_2 = \frac{29}{39} \approx 0.744$	5.65	59.0
IV	293	$i_3 = \frac{16}{50} = 0.32$	5.48	178.5
V	97.6	$i_4 = \frac{16}{48} \approx 0.333$	5.32	520.5
VI(шпиндель)	19.5	$i_5 = \frac{13}{65} = 0.20$	5.16	2527

3.2.2 Визначення модуля зубчастих передач верстата

Визначення модуля зубчастих передач модернізованого привода верстата 2М55 виконано на основі комплексного аналізу найбільш навантажених кінематичних ланцюгів. Згідно запропонованої модернізації у конструкції застосовано двошвидкісний двигун, що формує різні режими роботи. Перший режим характеризується максимальними крутними моментами при низьких обертах і використовується для силових операцій. Другий режим забезпечує високошвидкісну обробку легких сплавів і застосовується для операцій з підвищеною продуктивністю.

Лімітуючою ланкою виступає тихохідна пара $\frac{z_{19}}{z_{20}} = \frac{13}{65}$ (валів V – VI), яка працює в діапазоні $n = 19,5 \dots 97,6$ об/хв. Розрахунок проведено за двома критеріями працездатності, а саме на витривалість активних поверхонь зубів, що

визначає контактну міцність, та опір втомному зламу, який характеризує міцність на згин.

Для подальших розрахунків зубчастих передач приймається уточнене значення потужності, яке враховує додаткові коефіцієнти навантаження:

$$N_p = P_{\text{дв.пр}} \cdot K_K \cdot K_d \quad (3.14)$$

де $P_{\text{дв.пр}} = 6.00$ кВт – прийнята потужність привода;

$K_K = 1.15$ – коефіцієнт концентрації напружень;

$K_d = 1.3$ – коефіцієнт динамічності.

Після підстановки та обчислень отримаємо:

$$N_p = 6.0 \cdot 1.15 \cdot 1.3 \approx 8.97 \text{ кВт}$$

Саме це значення використовується у подальших розрахунках модуля зубчастих передач.

Матеріалом для виготовлення зубчастих коліс обрана легована сталь 40Х, яка після поверхневого гартування ТВЧ до твердості HRC 50 забезпечує високу зносостійкість і міцність робочих поверхонь. Така термообробка створює тверду поверхню при збереженні в'язкої серцевини, що є оптимальним для деталей, які працюють під змінними навантаженнями. При цьому допустимі напруження, які визначають контактну міцність поверхонь зубів будуть становити $[\sigma]_H = 820$ МПа, а допустимі напруження, які характеризують опір зуба втомному зламу відповідно будуть $[\sigma]_F = 340$ МПа.

Попередньо приймаємо коефіцієнт ширини вінця $\psi_m = 10$, який визначає конструктивне співвідношення між шириною зубчастого вінця та модулем. Він дозволяє розрахувати фактичну ширину вінця:

$$b = \psi_m \cdot m \quad (3.15)$$

Визначаємо модуль за контактною витривалістю. Розрахунок здійснюємо для тихохідної пари $z = 13$ при передаточній функції $i = 5$. При цьому мінімальний модуль визначається за формулою:

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

$$m_H = \sqrt{\frac{10^3 \cdot 2 \cdot N_p \cdot K \cdot (i + 1)}{z_2 \cdot n \cdot \psi_m \cdot [\sigma]_H^2 \cdot i}} \quad (3.16)$$

де $N_p = 8.97$ кВт – розрахункова потужність;

$K = 1.3$ – коефіцієнт, що враховує умови роботи передачі;

$i = 5$ – передавальне число;

$z_2 = 65$ – число зубів великого колеса;

$n = 20$ об/хв – частота обертання валу;

$\psi_m = 10$ – коефіцієнт ширини вінця;

$[\sigma]_H = 820$ МПа – допустиме контактне напруження.

Після підстановки числових значень отримуємо:

$$m_H = \sqrt{\frac{10^3 \cdot 2 \cdot 8.97 \cdot 1.3 \cdot (5 + 1)}{65 \cdot 20 \cdot 10 \cdot 820^2 \cdot 5}} \approx 0.058 \text{ мм}$$

Отримане розрахункове значення є надзвичайно малим, що підтверджує, що контактна міцність не є лімітуючою для обраних матеріалів і навантажень.

Визначаємо модуль за згинальною міцністю. Вихідними даними буде значення числом зубів шестерні $z = 13$ та прийнятий коефіцієнт форми зуба $Y_F = 4.4$.

4.4. При цьому мінімальний модуль визначається за формулою:

$$m_F = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^6 \cdot N_p \cdot K \cdot Y_F}{z \cdot n \cdot \psi_m \cdot [\sigma]_F^3}} \quad (3.17)$$

де $Y_F = 4.4$ – коефіцієнт форми зуба;

$[\sigma]_F = 340$ МПа – допустиме згинальне напруження.

Після підстановки числових значень отримуємо:

$$m_F = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^6 \cdot 8.97 \cdot 1.3 \cdot 4.4}{13 \cdot 20 \cdot 10 \cdot 340^3}} \approx 2.88 \text{ мм}$$

В таблиці 3.6 приведено зведені результати розрахунку для всіх груп передач.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Таблиця 3.6 – Розрахункові значення мінімального модуля зубчастих передач

Передача	z	i	n , об/хв	m_H , мм	m_F , мм	Прийнятий m , мм
1–2	33	0.846	1230	–	2.05	3.0
2–3	29	0.744	915	–	2.21	3.0
3–4	16	0.32	293	–	2.65	3.0
4–5	16	0.333	97.6	–	2.82	3.0
5–6	13	0.20	19.5	0,057	2.88	3.0

Аналіз отриманих результатів (табл. 3.6) показує, що для всіх кінематичних ланцюгів розрахункові значення модуля не перевищують 3.0 мм. Найбільш напруженою є тихохідна пара шпindelної групи, де розрахунковий модуль за вигином склав 2.88 мм. Вибір єдиного модуля $m = 3.0$ мм для всієї коробки швидкостей є технічно обґрунтованим, забезпечує необхідну витривалість привода при максимальних навантаженнях та сприяє уніфікації виробничого процесу.

3.2.3 Геометричний розрахунок зубчастих коліс

На основі прийнятого модуля $m = 3$ мм та попередньо обчислених чисел зубів (табл. 3.6) проведено геометричний розрахунок усіх зубчастих коліс коробки швидкостей. Для шестерень з малим числом зубів ($z < 17$), зокрема для шпindelної пари $z_{19}/z_{20} = 13/65$, передбачено позитивну корекцію зі зміщенням $x = +0.5$. Це дозволяє уникнути підрізання ніжки зуба та підвищити його міцність. Для великого колеса цієї пари прийнято відповідне від'ємне зміщення $x = -0.5$, що забезпечує збереження номінальної міжосьової відстані.

Розрахунок передбачає використання усталеної методики [6]. Для кожного колеса встановлюються ділильний діаметр, діаметр вершин і западин зубів, а також міжосьова відстань. При цьому враховуються стандартні коефіцієнти висоти головки та радіального зазору, а для шестерень із малим числом зубів

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

застосовується позитивна корекція профілю, що усуває підрізання ніжки та підвищує міцність.

Для обчислення ділильного діаметру скористаємось залежністю:

$$d = m \cdot z \quad (3.18)$$

де m – модуль, мм;

z – число зубів.

Висота головки зуба буде визначатись:

$$h_a = (h_a^* + x) \cdot m \quad (3.19)$$

де $h_a^* = 1$ – коефіцієнт висоти головки;

x – коефіцієнт зміщення.

Для визначення висоти ніжки зуба використовуємо залежність:

$$h_f = (h_a^* + c^* - x) \cdot m \quad (3.20)$$

де $c^* = 0.25$ – коефіцієнт радіального зазору.

Для розрахунку повної висоти зуба скористаємось виразом:

$$h = h_a + h_f = (2h_a^* + c^*) \cdot m \quad (3.21)$$

Значення діаметра вершин зубів буде визначатись:

$$d_a = d + 2 \cdot h_a \quad (3.22)$$

Для обчислення діаметру западин зубів використовуємо залежність:

$$d_f = d - 2 \cdot h_f \quad (3.23)$$

Величину міжосьової відстані можемо визначити з виразу:

$$A = \frac{m \cdot (z_1 + z_2)}{2} + (x_1 + x_2) \cdot m \quad (3.24)$$

де z_1, z_2 – числа зубів пари;

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

x_1, x_2 – коефіцієнти зміщення для шестерні та колеса.

Для автоматизації обчислювальних циклів та верифікації параметричних зв'язків використано програмний пакет MathCAD [30]. Це дозволило контролювати коректність формування геометрії при застосуванні зміщення вихідного контуру. Кінцеві результати геометричного синтезу наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Геометричні параметри зубчастих коліс коробки швидкостей

Пара	z_1/z_2	x_1/x_2	d_1 , мм	d_2 , мм	d_{a1} , мм	d_{a2} , мм	d_{f1} , мм	d_{f2} , мм	A , мм
1-2	33/39	0/0	99.0	117.0	105.0	123.0	91.5	109.5	108.0
2-3	29/39	0/0	87.0	117.0	93.0	123.0	79.5	109.5	102.0
3-4	29/37	0/0	87.0	111.0	93.0	117.0	79.5	103.5	99.0
4-5	16/50	0/0	48.0	150.0	54.0	156.0	40.5	142.5	99.0
5-6	13/65	+0.5/-0.5	39.0	195.0	48.0	201.0	34.5	187.5	117.0

3.2.4 Розрахунок діаметрів валів коробки швидкостей

На основі розрахункових крутних моментів для двошвидкісного двигуна АИР132 S4/2 (6.0/7.1 кВт, 1455/2900 об/хв) виконується проєктний розрахунок діаметрів валів коробки швидкостей. Методика базується на умові міцності на кручення й застосуванні узагальненого коефіцієнта C , що враховує допустиме напруження для сталі 40Х.

Формула для визначення діаметра має вигляд:

$$d_i = C \cdot \sqrt[3]{\frac{N_i}{n_i}} \quad (3.25)$$

де, d_i – розрахунковий діаметр вала, мм;

N_i – потужність, що передається валом, кВт;

n_i – частота обертання вала, об/хв;

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

$C = 125$ – коефіцієнт, що враховує допустиме напруження на кручення для сталі 40Х.

Для валів коробки швидкостей прийнято $[\tau]_k = 25$ МПа з урахуванням осьових навантажень. Розраховані значення округлюються до найближчих більших стандартних діаметрів за [10], що узгоджуються з посадочними місцями підшипників.

Таблиця 3.8 – Проектні діаметри валів привода

Вал	N , кВт	n , об/хв	Розрахунковий d , мм	Прийнятий d , мм
I (двигун)	6.0			38
II	5.82	1230	23.1	25
III	5.65	915	25.5	30
IV	5.48	293	36.9	40
V	5.32	97.6	52.1	55

Вал I (двигун) має діаметр 38 мм за конструкцією двигуна і не потребує розрахунку.

3.2.5 Розрахунок та вибір підшипників

Для забезпечення довговічної та стабільної роботи коробки швидкостей після модернізації приводу проведено розрахунок навантажень у зачепленнях та вибір відповідних підшипників [3]. Вихідними даними слугують діаметри валів, частоти їх обертання та крутні моменти, визначені у попередніх пунктах розділу.

Колова сила для прямозубих циліндричних коліс визначається виразом:

$$F_t = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot M}{d} \quad (3.26)$$

де M – крутний момент на валу, Н·м;

d – дільний діаметр шестерні, мм.

Тоді радіальна складова обчислюється як:

$$F_r = F_t \cdot \tan \alpha, \alpha = 20^\circ \quad (3.27)$$

Результуюча сила у зачепленні, що враховує одночасну дію колової та радіальної складових може бути визначена:

$$F_\Sigma = \sqrt{F_t^2 + F_r^2} \quad (3.28)$$

Отримані результати розрахунку зведені в таблицю 3.9.

Таблиця 3.9 – Сили, що діють у зачепленні зубчастих пар

Пара	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	Шестерня	$d, \text{мм}$	$F_t, \text{Н}$	$F_r, \text{Н}$	$F_\Sigma, \text{Н}$
1 – 2	45.2	$z_1 = 33$	99.0	913	332	972
2 – 3 (29/39)	59.0	$z_3 = 29$	87.0	1356	494	1442
2 – 3 (33/35)	59.0	$z_5 = 33$	99.0	1192	434	1269
3 – 4 (29/37)	178.5	$z_7 = 29$	87.0	4103	1494	4370
3 – 4 (22/44)	178.5	$z_9 = 22$	66.0	5409	1969	5748
3 – 4 (16/50)	178.5	$z_{11} = 16$	48.0	7438	2707	7915
4 – 5 (16/48)	520.5	$z_{15} = 16$	48.0	21688	7894	23000
4 – 5 (48/30)	520.5	$z_{17} = 48$	144.0	7229	2631	7670
5 – 6 (13/65)	520.5	$z_{19} = 13$	39.0	26692	9716	28400

Для визначення реакцій опор використовується правило важеля:

$$R_A = F_\Sigma \cdot \frac{b}{L}; \quad R_B = F_\Sigma \cdot \frac{a}{L}; \quad L = a + b. \quad (3.29)$$

Результати розрахунку реакцій опор по валах приведені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Реакції опор валів ($L = 220$ мм)

Вал	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	$F_t, \text{Н}$	$F_r, \text{Н}$	Плечі $a/b, \text{мм}$	$R_A, \text{Н}$	$R_B, \text{Н}$
<i>II</i>	45.2	913	332	110 / 110	486	486
<i>III</i>	59.0	1356	494	80 / 140	918	525
<i>IV</i>	178.5	7438	2707	100 / 120	4316	3597
<i>V</i>	520.5	26692	9716	70 / 150	19365	9037

Для перевірки довговічності підшипників необхідно розрахувати еквівалентне навантаження яке вони можуть нести:

$$P = R_{\max} \cdot V \cdot K_{\delta} \cdot K_t \quad (3.30)$$

де R_{\max} – максимальна реакція опори;

$V = 1$ – коефіцієнт обертання;

$K_{\delta} = 1.2$ – коефіцієнт безпеки;

$K_t = 1$ – температурний коефіцієнт.

Розрахунок також передбачає визначення довговічності підшипників:

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \quad (3.31)$$

де C – динамічна вантажопідйомність підшипника.

Для оцінки також використовується показник, який визначає довговічність у годинах:

$$L_{10h} = \frac{10^6 \cdot L}{60 \cdot n}, \quad (3.32)$$

де n – частота обертання вала.

У прототипі (мод. 2М55) використовувалися підшипники серій 200 та 300, які забезпечували лише базову працездатність [1]. Перевірка показала, що їхній ресурс і швидкісні характеристики обмежені та відповідають рівню технологій 80-90 років минулого століття. Це не задовольняє сучасні вимоги до довговічності та стабільності роботи.

Для модернізованої конструкції приводу ми будемо використовувати підшипники *SKF Explorer* [36], які мають підвищену вантажопідйомність та

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

довговічність. Основні характеристики цих підшипників приведені в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Обрані типорозміри підшипників

Вал	Діаметр, мм	Тип SKF	C, кН	C ₀ , кН
<i>II</i>	25	6205	14.0	7.8
<i>III</i>	30	6206	19.5	11.2
<i>IV</i>	40	6208	29.1	17.8
<i>V</i>	55	6311	74.1	45.0

Для цих підшипників виробник ввів коефіцієнт корегування довговічності a_{SKF} . При цьому виробник пропонує власну уточнену залежність для розрахунку довговічності підшипників:

$$L_{nmh} = a_1 \cdot a_{SKF} \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \left(\frac{C}{P} \right)^3 \quad (3.33)$$

де, a_1 – коефіцієнт надійності (для стандартної 90 % надійності приймається $a_1 = 1$);

a_{SKF} – додатковий коефіцієнт, що враховує границю витривалості матеріалу (P_u), якість мастила (κ) та рівень забруднення (η_c), $a_{SKF} = 2$;

C – динамічна вантажопідйомність підшипника, Н;

P – еквівалентне навантаження, Н;

n – частота обертання вала, об/хв.

Для зручності результати розрахунків зводимо в таблицю 3.12.

Таблиця 3.12 – Розрахунок довговічності підшипників SKF Explorer

Вал	Тип SKF	C, кН	R_{max} , кН	P , кН	n , об/хв	L_{nmh} , год
<i>II</i>	6205	14.0	0.49	0.59	1230	> 100 000
<i>III</i>	6206	19.5	0.92	1.10	915	196 400
<i>IV</i>	6208	29.1	4.32	5.18	293	20 200
<i>V</i>	6311	74.1	19.37	23.24	97.6	9 880

3.3 Опис системи змащування та ущільнень

Ефективність роботи коробки швидкостей після модернізації приводу з двошвидкісним двигуном АИР132 S4/2, що забезпечує підвищення максимальної частоти обертання шпинделя до 4000 об/хв, визначається якістю організації системи змащування та герметизації. Зростання швидкостей і крутних моментів потребує адаптації цих систем до нових умов експлуатації, адже саме вони створюють середовище для довговічності підшипників і стабільності роботи зубчастих передач.

Основним способом змащування залишається картерне, коли зубчасті колеса нижніх блоків занурюються в масляну ванну на висоту кількох модулів. При їх обертанні утворюється масляний туман, який рівномірно розподіляється по зачепленнях і підшипникових вузлах, формуючи захисну плівку на поверхнях тертя. З огляду на більш широкий діапазон частот обертання було обрано індустріальне масло *ISO VG 32*. Воно зберігає стабільну в'язкість при температурах до 90 °C і добре утримується на поверхнях навіть за колдових швидкостей до 10 м/с.

Для контролю рівня масла в корпусі коробки передбачено масловказівник, а в нижній частині картера встановлено магнітну пробку, яка затримує продукти зносу. Підшипники валів II – IV отримують мастило завдяки розбризкуванню масляного туману, що утворюється при роботі зубчастих коліс. Найбільш навантажений підшипник 6311 вала V має додаткове підведення масла через канали корпусу, що забезпечує ефективніший тепловідвід і зменшує втрати на тертя. Регламент заміни мастила передбачає першу заміну після 200 годин обкатки, а далі через кожні 2000 годин роботи або один раз на рік. Якщо верстат часто працює на верхньому діапазоні обертів, інтервал заміни скорочується до 1500 годин.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		68

Зростання частоти обертання вхідного валу до 3000 об/хв підвищує ризик витоків масла через відцентрові ефекти та внутрішній тиск. Для запобігання цьому застосовано комплекс рішень. Так на вихідних кінцях валів встановлено манжетні ущільнення відповідно до ДСТУ ISO 6194-1:2015 [11]. Для вала II використано манжету з фторкаучуку, яка витримує високі температури й швидкості до 15 м/с, зберігаючи еластичність. Інші вали оснащені стандартними гумовими армованими манжетами з пильовиком.

У зонах інтенсивного руху масла застосовано лабіринтові ущільнення, що повертають мастило назад у картер. Для вирівнювання тиску корпус обладнано сапуном із фільтруючим елементом, який усуває «видавлювання» масла через стики. Нерухомі з'єднання корпусу та кришок герметизуються паронітовими прокладками або тонким шаром бензостійкого силіконового герметика, що гарантує герметичність протягом усього міжремонтного циклу.

Запропонована система створює стабільний мастильний шар на зубцях і в підшипниках навіть при підвищених швидкостях, знижує температуру в зоні контакту, продовжує ресурс підшипників *SKF Explorer* і мінімізує витoki масла. Вона відповідає сучасним вимогам екологічної безпеки та чистоти робочого місця, а технічне обслуговування спрощується завдяки наявності масловказівника, магнітної пробки й зручних точок заміни ущільнень.

3.4 Висновки до 3 розділу

У конструкторській частині було обґрунтовано вибір та здійснено розрахунок параметрів приводу головного руху радіально-свердлильного верстата. Проведений аналіз показав, що базова модель 2М55 із діапазоном регулювання частот 20 – 2000 об/хв не відповідає сучасним вимогам високошвидкісної обробки, особливо при свердлінні отворів малого діаметра в алюмінієвих сплавах. Для досягнення рекомендованих швидкостей різання необхідно забезпечити частоту обертання шпинделя до 4000 об/хв.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		69

Розрахунки підтвердили доцільність застосування двошвидкісного асинхронного двигуна АИР132 S4/2 із синхронними частотами 1500 та 3000 об/хв. Це рішення дозволяє розширити діапазон регулювання до $Rn = 200$, забезпечуючи універсальність верстата. Так нижній діапазон використовується для роботи зі сталлю та великими діаметрами, а верхній для високошвидкісної обробки алюмінію. При цьому конструкція коробки швидкостей залишається незмінною, що робить модернізацію економічно та технічно виправданою.

Побудовані структурні формули та структурні сітки для 21 і 24 ступенів частот обертання підтвердили раціональність розподілу передатних відносин. Це забезпечує рівномірне розширення діапазону швидкостей, зниження навантажень на проміжні вали та оптимізацію кінематичного ланцюга. Графік чисел обертів показав узгодженість роботи приводу в обох діапазонах, а енергетичний розрахунок довів достатність потужності нового двигуна для найважчих режимів свердління.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Правове забезпечення та організаційно–функціональна структура захисту населення

Правове забезпечення цивільного захисту населення в Україні спирається на Конституцію, де у статтях 27, 49 та 50 закріплено право кожної людини на життя, охорону здоров'я, безпечне довкілля та відшкодування шкоди. На цих конституційних положеннях вибудована широка система нормативно–правових актів, що регулюють діяльність державних органів, місцевого самоврядування, підприємств і громадян у сфері запобігання надзвичайним ситуаціям та ліквідації їхніх наслідків [23].

Ключовим документом є Кодекс цивільного захисту України [17]. Він визначає засади функціонування єдиної державної системи цивільного захисту, права та обов'язки громадян і суб'єктів господарювання, порядок створення сил цивільного захисту та режими реагування на надзвичайні ситуації природного, техногенного чи воєнного характеру.

Поряд із Кодексом діють закони: «Про надзвичайний і воєнний стан», «Про захист населення і територій від надзвичайних ситуацій», «Про аварійно–рятувальні служби», «Про об'єкти підвищеної небезпеки», «Про охорону праці», «Про пожежну безпеку», «Про мобілізаційну підготовку», «Про перевезення небезпечних вантажів», «Про охорону довкілля та санітарно–епідемічне благополуччя». Підзаконний рівень представлений указами Президента, постановами Кабінету Міністрів, наказами центральних органів виконавчої влади, зокрема ДСНС, а також державними будівельними нормами, стандартами й галузевими інструкціями.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разроб.</i>		<i>Вальчишин В.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Окіпний І.Б.</i>			<i>Лит.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Реценз.</i>						<i>71</i>	<i>7</i>
<i>Н. Контр.</i>		<i>Кабельник В. Р.</i>			<i>ТНТУ ім. І. Пулюя зр. МВ-41, м. Тернопіль</i>		
<i>Затверд.</i>		<i>Крцпа В.В.</i>					
БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ							

Організаційно функціональна структура цивільного захисту ґрунтується на Єдиній державній системі цивільного захисту, яка поєднує територіальні та функціональні підсистеми. Територіальні формуються в областях, районах і містах обласного значення, тоді як функціональні створюються при центральних органах виконавчої влади для координації дій у відповідних галузях.

Система управління має чотири рівні. На державному рівні керівництво здійснюють Кабінет Міністрів, Рада національної безпеки і оборони та Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Регіональний рівень охоплює обласні адміністрації та Київську міську адміністрацію. Місцевий рівень представлений районними державними адміністраціями та органами місцевого самоврядування. Об'єктовий рівень забезпечують керівники підприємств, установ і організацій, які відповідають за реалізацію заходів цивільного захисту безпосередньо на своїх виробничих чи адміністративних майданчиках.

Центральним органом виконавчої влади у сфері цивільного захисту є Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Вона реалізує державну політику у сфері захисту населення і територій, пожежної безпеки, діяльності аварійно-рятувальних служб та техногенної безпеки. До сил цивільного захисту належать оперативно-рятувальна служба ДСНС, державна пожежно-рятувальна служба, служба медицини катастроф, спеціалізовані служби (медичні, інженерні, комунально-технічні, транспортні, зв'язку), аварійно-рятувальні формування підприємств та добровільні об'єднання населення.

Функціонування системи передбачає три режими. У режимі повсякденного функціонування здійснюється профілактика, моніторинг і навчання. Режим підвищеної готовності вводиться при загрозі надзвичайної ситуації, коли активізуються сили та засоби. Режим надзвичайної ситуації застосовується з моменту її виникнення й передбачає реагування, проведення рятувальних робіт та ліквідацію наслідків.

З 2022 року, в умовах воєнного стану, система цивільного захисту інтегрована в загальну систему територіальної оборони. Сили ДСНС взаємодіють із Збройними Силами, Національною гвардією та органами

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		72

місцевого самоврядування, що забезпечує єдине управління рятувальними роботами, розмінуванням територій, евакуацією населення та підтриманням функціонування критичної інфраструктури.

Кодекс цивільного захисту визначає права й обов'язки громадян. Кожен має право на захист життя і здоров'я, на отримання достовірної інформації про загрози, на соціальну підтримку у випадку постраждання, а також на участь у заходах цивільного захисту. Водночас громадяни зобов'язані дотримуватися правил безпеки, виконувати законні розпорядження органів управління, допомагати постраждалим і повідомляти про загрози. Суб'єкти господарювання повинні розробляти плани локалізації та ліквідації аварій, створювати об'єктові формування цивільного захисту, навчати працівників, утримувати захисні споруди, формувати матеріальні резерви й накопичувати фінансові ресурси для ліквідації наслідків можливих надзвичайних ситуацій.

4.2 Небезпеки, що виникають при роботі на свердлильному верстаті та заходи щодо їх усунення

Проектований радіально–свердлильний верстат належить до обладнання з підвищеним рівнем безпеки. Після модернізації приводу, коли двигун замінено на двошвидкісний і максимальна частота обертання шпинделя зросла до 4000 об/хв, спектр ризиків значно розширився.

Механічні небезпеки можуть виникати при контакті з обертовими частинами шпинделя, патрона, свердла, пасових та зубчастих передач. Вони можуть захопити одяг чи руки, що призводить до тяжких травм. Особливо небезпечно працювати в рукавицях, які легко намотуються на обертові елементи. Додатковим ризиком є відліт стружки та уламків при обробці крихких матеріалів або перевантаженні інструменту. Незакріплена заготовка здатна вирватися з лещат і травмувати оператора. Падіння інструменту чи пристосувань через неправильне зберігання також створює небезпеку.

Електричні ризики виникають при пошкодженні ізоляції кабелів, відсутності заземлення чи несправності пускової апаратури.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		73

Фізичні фактори включають шум, який може перевищувати 80 дБА і спричиняти професійну туговухість, а також вібрацію, що виникає при дисбалансі обертових частин на високих швидкостях.

Для свердління сталей на високих швидкостях температура в зоні контакту свердла з металом може сягати $500 \div 700$ °С. Стружка, що відлітає, зберігає температуру близько $200 \div 300$ °С, що достатньо для серйозного опіку або займання замащеного ганчір'я [22].

Недостатнє освітлення робочої зони підвищує ймовірність помилок.

Хімічні небезпеки пов'язані з мастильно–охолоджувальними рідинами, які при контакті зі шкірою викликають дерматити та алергічні реакції, а їхні аерозолі подразнюють дихальні шляхи. Металевий пил при обробці алюмінію чи свинцю є токсичним, а пролите мастило створює слизьку поверхню й ризик падіння [22].

Ергономічні та організаційні чинники проявляються у тривалій статичній позі, надмірному зоровому навантаженні, поспіху, відволіканні уваги, недостатньому навчанні персоналу та використанні несправного інструменту.

Заходи безпеки реалізуються комплексно. Технічні рішення передбачають встановлення прозорих захисних екранів із полікарбонату, огороження пасових і зубчастих передач, використання безключових патронів, аварійних кнопок, балансування обертових частин, застосування системи місцевої вентиляції та заземлення корпусу [22].

Організаційні заходи охоплюють навчання та інструктажі, дотримання встановлених режимів різання, підтримання порядку на робочому місці та контроль параметрів виробничого середовища.

Засоби індивідуального захисту включають захисні окуляри або щитки, спеціальний одяг без звисаючих елементів, взуття з протиковзкою підошвою, беруші чи навушники для зниження шуму, а також бар'єрні креми для рук, що запобігають шкідливому впливу мастильно–охолоджувальних рідин.

Окремо слід наголосити на заборонених діях. Не можна залишати ключ у патроні після закріплення інструменту, тримати заготовку руками, видаляти стружку під час роботи, залишати верстат без нагляду, використовувати затуплений інструмент чи перевищувати паспортні режими.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

Модернізація верстата 2М55 потребує додаткових заходів. Необхідне провести балансування шпинделя, патрону та інструменту. Оскільки ми збільшили частоту обертання шпинделя, то слід здійснити підсилення захисних огорожень, провести перевірку міцності кріплення верстата до фундаменту, а також оновити інструкцію з експлуатації та провести додаткове навчання персоналу.

4.3 Змащувальні охолоджуючі рідини та їх використання на металообробних верстатах. Гігієна праці при роботі із ЗОР

Модернізація радіально–свердлильного верстата 2М55 із встановленням двошвидкісного двигуна АИР132 S4/2, що забезпечує частоту обертання шпинделя до 4000 об/хв, потребує особливої уваги до системи подачі змащувально–охолоджувальних рідин. Для обробки отворів малого діаметра в алюмінієвому сплаві АК5М7 застосовуються твердосплавні свердла–зенкери *Walter Titex DC170 Supreme* з внутрішніми каналами, які подають рідину безпосередньо в зону різання. Такий підхід дозволяє ефективно відводити тепло при швидкостях різання до 150 м/хв, забезпечує якісне видалення стружки з глибини отвору та зменшує тертя на задній поверхні інструменту, що підвищує його стійкість. Для реалізації цієї системи шпиндель обладнується обертовим з'єднанням і гнучким рукавом високого тиску, а додатковий насос створює тиск у межах 10 ÷ 20 бар.

Вибір рідини для алюмінієвих сплавів має вирішальне значення. Оскільки вони схильні до налипання на ріжучу кромку, пріоритетними є синтетичні або напівсинтетичні склади з високою охолоджувальною здатністю та низькою в'язкістю. Концентрація емульсії повинна становити 3–5 %, а хімічний склад не містити хлорних сполук чи формальдегідних біоцидів. Для універсальної роботи зі сталями можливе застосування емульсій на основі сульфозфрезолу, проте при переході на алюміній необхідно ретельно очищати систему, щоб уникнути забруднення поверхні деталей.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

Використання ЗОР на високих швидкостях створює додаткові гігієнічні ризики. Утворення дрібнодисперсного аерозоллю може спричинити дерматологічні проблеми, такі як контактний дерматит чи фолікуліт, а також респіраторні захворювання, включно з професійною астмою та алергічним альвеолітом. Підвищений тиск подачі іноді призводить до раптового викиду гарячої рідини при розгерметизації системи.

Для зменшення небезпек необхідно поєднувати технічні, організаційні та індивідуальні заходи. Технічні рішення включають прозорі екрани з полікарбонату, місцеву витяжну вентиляцію, герметичні з'єднання та регулярну перевірку системи подачі. Організаційні заходи передбачають контроль концентрації та рН рідини, своєчасну заміну при ознаках гниття, збір відпрацьованих ЗОР у герметичні ємності та їх утилізацію спеціалізованими підприємствами. Засоби індивідуального захисту охоплюють бар'єрні креми для рук, захисні окуляри чи щитки, спецодяг із водовідштовхувальної тканини, нітрилові рукавиці для допоміжних операцій, респіратори при перевищенні гранично допустимих концентрацій аерозоллю. Важливо дотримуватися правил особистої гігієни: не торкатися обличчя під час роботи, не приймати їжу на робочому місці, після зміни ретельно мити руки та прати змінний одяг.

Медико–профілактичні заходи включають попередні та періодичні огляди працівників у дерматолога й терапевта. Особи з хронічними дерматозами чи алергічними захворюваннями до роботи із ЗОР не допускаються. При появі симптомів ураження шкіри чи дихальних шляхів необхідно негайно припинити контакт із рідиною та звернутися до лікаря.

Таким чином, застосування змашувально–охолоджувальних рідин із внутрішнім підведенням через інструмент є необхідною умовою ефективної обробки алюмінієвих сплавів на модернізованому верстаті 2M55. Поєднання технічних рішень, організаційних заходів і засобів індивідуального захисту створює безпечні умови праці, мінімізує ризики професійних захворювань і забезпечує стабільну роботу обладнання.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		76

4.4 Висновки до 4 розділу

Розділ «Безпека життєдіяльності та основи охорони праці» показав, що ефективна організація виробничого процесу неможлива без комплексного підходу до правового забезпечення, технічних рішень та гігієни праці.

Правова база України у сфері цивільного захисту створює чітку систему нормативних актів, яка визначає права та обов'язки громадян, підприємств і державних органів. Вона забезпечує багаторівневу організаційно-функціональну структуру, здатну реагувати на надзвичайні ситуації природного, техногенного та воєнного характеру.

Робота на свердлильному верстаті, особливо після модернізації приводу з підвищенням частоти обертання шпинделя до 4000 об/хв, супроводжується значним спектром небезпек: механічних, електричних, фізичних, хімічних та організаційних. Їх усунення можливе лише за умови поєднання технічних рішень (захисні екрани, вентиляція, заземлення), організаційних заходів (навчання, контроль режимів, порядок на робочому місці) та використання засобів індивідуального захисту.

Застосування змащувально-охолоджувальних рідин із внутрішнім підведенням через інструмент є необхідною умовою якісної обробки алюмінієвих сплавів. Водночас воно створює додаткові гігієнічні ризики, які потребують системного контролю: від технічних рішень (герметизація, витяжна вентиляція) до організаційних заходів (контроль складу та стану рідини) і медико-профілактичних оглядів персоналу.

Безпека праці при роботі на модернізованому верстаті 2М55 забезпечується комплексним поєднанням правових норм, технічних і організаційних рішень, засобів індивідуального захисту та гігієнічних вимог. Такий підхід мінімізує ризики травматизму й професійних захворювань, гарантує стабільність виробничого процесу та відповідає сучасним стандартам охорони праці.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		77

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження, спрямоване на вдосконалення технологічного процесу виготовлення корпусної деталі «Картер коробки передач 26.11-Ж2» та модернізацію приводу головного руху радіально-свердлильного верстата 2М55.

Проведений аналіз вихідних даних і базового технологічного процесу показав, що існуюча схема виробництва має суттєві недоліки, а саме надмірну кількість операцій, використання застарілого обладнання та значну частку ручних робіт. Це призводить до втрати точності, високої трудомісткості та енергозатратності. Обґрунтовано доцільність виготовлення заготовки литтям під тиском зі сплаву АК5М7, що забезпечує високу точність і зменшені припуски на механічну обробку.

Запропонований модернізований технологічний процес передбачає концентрацію операцій на сучасних обробних центрах із ЧПК, скорочення кількості переходів більш ніж утричі та заміну ручних операцій механізованими. Використання комбінованого інструменту та впровадження координатно-вимірювальної машини *Hexagon Global* дозволило підвищити точність до $IT6 - IT7$ та забезпечити автоматизований контроль складних просторових допусків.

Вибір інструментів здійснено з урахуванням особливостей алюмінієвого сплаву АК5М7. Застосування інструментів серії *NM* від *Sandvik Coromant*, твердосплавних свердел *Walter Titex DC170 Supreme* та системи *CoroBore® 825* забезпечує стабільність процесу, якісне стружкоутворення та досягнення високих параметрів точності й шорсткості поверхні.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>ВИСНОВКИ</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Вальчишин В.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Склярів Р.А.</i>					
<i>Реценз.</i>							
<i>Н. Контр.</i>		<i>Кабельник В. Р.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Крцпа В.В.</i>					
					<i>Лит.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
						<i>78</i>	<i>2</i>
					<i>ТНТУ ім. І. Пулюя гр. МВ-41, м. Тернопіль</i>		

Техніко-економічні розрахунки підтвердили ефективність запропонованих рішень. Основний час обробки однієї деталі скорочено з понад 100 хвилин до 9 хвилин, що забезпечує більш ніж десятикратне зростання продуктивності. Досягнуто зменшення енергоспоживання, підвищення точності та стабільності якості в умовах середньосерійного виробництва.

Конструкторська частина роботи довела доцільність заміни штатного двигуна верстата 2М55 на двошвидкісний асинхронний АИР132 S4/2. Це рішення дозволило розширити діапазон регулювання частот обертання шпинделя до 4000 об/хв, що відповідає вимогам високошвидкісної обробки алюмінію. Енергетичний та кінематичний розрахунки підтвердили достатність потужності двигуна та працездатність коробки швидкостей. Додатково виконано розрахунок опорних вузлів і вибір прецизійних підшипників *SKF Explorer*, що забезпечують ресурс роботи понад нормативні вимоги.

У розділі охорони праці проведено аналіз небезпечних факторів при роботі на модернізованому верстаті та розроблено комплекс заходів безпеки: технічних, організаційних та індивідуальних. Особливу увагу приділено гігієні праці при використанні змащувально-охолоджувальних рідин із внутрішнім підведенням, що мінімізує ризики професійних дерматитів і респіраторних захворювань.

Таким чином, результати роботи мають практичну цінність для машинобудівних підприємств, що використовують верстати типу 2М55. Запропоновані рішення дозволяють суттєво підвищити продуктивність, знизити витрати, покращити умови праці та забезпечити стабільну якість продукції при мінімальних витратах на модернізацію обладнання.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		79

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. 255 Верстат радіально–свердлильний: опис, характеристики, схеми [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.metalinstryment.com/sprav_255.htm
2. Багатошвидкісні електродвигуни: каталог і характеристики [Електронний ресурс] // ТОВ «Системи якості». – Режим доступу: <https://xn--80aqy.com.ua/uk/bagatoshvydkisni/dvoshvydkisni/>
3. Бочков В. М., Сілін Р. І. Обладнання автоматизованого виробництва. Навчальний посібник / За ред. Сіліна Р. І. – Львів: Видавництво Державного університету “Львівська політехніка”, 2000. – 380с.
4. 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.
5. 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.
6. Деталі машин : курс лекцій / Н. І. Хомик, А. Д. Довбуш, О. П. Цьонь. – Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2016. – 160 с.
7. ДСТУ 2391:2010. Система технологічної документації. Терміни та визначення основних понять. [Чинний від 2011–01–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2011. 34 с.
8. ДСТУ EN 1706:2014. Алюміній та сплави алюмінію литі. Хімічний склад та механічні властивості. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. – 34 с.

<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>				
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Вальчишин В.</i>		
<i>Перевір.</i>		<i>Склярів Р.А.</i>		
<i>Реценз.</i>				
<i>Н. Контр.</i>		<i>Кобельник В. Р.</i>		
<i>Затверд.</i>		<i>Крупа В.В.</i>		
<i>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ</i>				
		<i>Лит.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
		80	6	6
<i>ТНТУ ім. І. Пулюя зр. МВ-41, м. Тернопіль</i>				

9. ДСТУ ISO 14955–1:2019 (ISO 14955–1:2017, IDT). Верстати. Екологічне оцінювання верстатів. Частина 1. Методологія енергоефективного проектування верстатів. – [Чинний від 2020–01–01]. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 38 с. – (Національний стандарт України).

10. ДСТУ ISO 3:2019 (ISO 3:1973, IDT). Числа переважні та ряди переважних чисел. – [Чинний від 2020–01–01]. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 12 с.

11. ДСТУ ISO 6194–1:2015 (ISO 6194–1:2007, IDT). Ущільнювальні пристрої валів з еластомірними елементами, що обертаються. Частина 1. Номінальні розміри та допуски. – [Чинний від 2017–01–01]. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2015. – 18 с.

12. Дубиняк С. А., Нагорняк С. Г., Дубецький І. Д. Розрахунок передач, валів, муфт і тягових пристроїв металорізальних верстатів. Методичні рекомендації по курсовому та дипломному проектуванні МРВ для студентів спеціальності 0501 – Тернопіль. – 1981. – 62 с.

13. Кваліфікаційна робота бакалавра: структура, вимоги до виконання та захист. Методичні рекомендації для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за освітньо–професійною програмою «Галузеве машинобудування» зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування галузі знань 13 Механічна інженерія для здобувачів всіх форм здобуття освіти / уклад.: Р. А. Склярів, В. Р. Кобельник, В. В. Крупа, Р. Я. Лещук, А. А. Сенік, В. В. Шанайда, А. В. Гагалюк, В. М. Буховець. – Тернопіль : ТНТУ, 2025. 78 с.

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

15. Кобельник В. Р. Методика дослідження кінематичної точності механізму подач вертикально–свердлильних 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.

16. Кобельник В. Р. Підвищення ефективності процесу свердління наскрізних отворів регулюванням подачі: *дис. канд. техн. наук: 05.03.01*: / Кобельник

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		81

Володимир Романович; Терноп. нац. техн. ун–т ім. Івана Пулюя. – Т., 2013. – 21 с.

17. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 № 5403–VI. Редакція від 01.01.2026. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>

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

19. Крупа В. В., Кобельник В. Р. Призначення режимів різання при точінні табличним методом : Навчальний посібник – практикум. Тернопіль : ФОП ПАЛЯНИЦЯ, 2025. 144 с.

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

21. Металорізальні верстати. Кінематичний аналіз. Практикум до виконання практичних та лабораторних робіт [Електронний ресурс]: Навч. посібник для студ. спеціальностей 131 «Прикладна механіка» та 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Металорізальні верстати та системи» / О.В. Шевченко, А.Ю. Беляєва ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 6,5 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 86 с.

22. Охорона праці та цивільний захист [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій» спец. 131 Прикладна механіка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. Г. Левченко. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 362 с.

23. Охорона праці та цивільний захист [Електронний ресурс]: Курс лекцій: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра освітніми програмами «Електронні мікро– і наносистеми та технології» та «Мікро– та наноелектроніка» спец. 153 «Мікро– та наносистемна техніка» ФЕЛ / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. І. Полукаров, Н.Ф. Качинська. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 241 с.

24. Паливода Ю. Є., Дячун А. Є., Лещук Р. Я. Інструментальні матеріали, режими різання і технічне нормування механічної обробки: навчальний

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		82

посібник. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. 240 с.

25. Процеси виготовлення машин. Частина 1: технологічні основи машинобудування : навчальний посібник / А. В. Гагалюк, Ю. Є. Паливода. – Тернопіль: Осадца Ю. В., 2025. – 308 с.

26. Скляр Р. А., Гагалюк А. В. Використання методу нейронних мереж для прогнозування металорізальних верстатів. Матеріали ХХІ наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя, 16–17 травня 2019 року. – Тернопіль : ТНТУ, 2019. – 212 с. (Машинознавство та машинобудування). – С. 34

27. Скляр Р. А., Шанайда В. В. Використання багатофункціонального пакету Mathcad при прогнозуванні параметрів металорізальних верстатів. Збірник тез ХVІ наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (5 – 6 грудня 2012 р.). У 2Т. – Тернопіль : ТНТУ, 2012 – Т.2 Матеріалознавство та машинобудування. – 143 с., – С. 69.

28. Скляр Р.А. Четвержук Т. І., Полінкевич Р.М., Редько Р. Г., Системний підхід як основа автоматизації проектування та модернізації токарного верстатного обладнання // Прикладні науково–технічні дослідження : матеріали V міжнар. наук.–прак. конф., 5–7 квіт. 2021 р. – Академія технічних наук України. – Івано–Франківськ : Видавець Кушнір Г. М. – 2021. – 436с, – С. 157–159

29. Четвержук Т. І., Статистичне моделювання технічних характеристик металорізальних верстатів / Четвержук Т. І., Полінкевич Р. М., Редько Р. Г., Залета О. М., Скляр Р. А. // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк : – 2021. Випуск №71, С. 322–329.

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

31. Шанайда В. В. Створення схем формоутворення внутрішніх різей на основі принципів структурно–векторного синтезу. *Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорт* : Зб. тез доп. наук. конф. ТНТУ МТФ, м. Тернопіль, 16 трав. 2011 р. – Тернопіль, 2011. С. 109–110.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		83

32. DMG MORI. *CMX 800 V – Vertical Milling* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://en.dmgmori.com/products/machines/milling/vertical-milling/cmх-v/cmх-800-v>

33. DMG MORI. *NHX Series – Horizontal Milling* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://en.dmgmori.com/products/machines/milling/horizontal-milling/nhx>

34. DN Solutions. *DNM 4000 – High Productivity Vertical Machining Center* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dn-solutions.com/us/product/machining-center/vertical/dnm-4000.do>

35. Hexagon Manufacturing Intelligence. *7.10.7 SF – Shop Floor CMM* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hexagon.com/products/7-10-7-sf>

36. Rolling bearings. SKF General Catalogue / SKF Group. – Publication No. 17000 EN. – 2018. – 1152 p.

37. Sandvik Coromant. *Bearing house – face and shoulder milling with CoroMill® 490* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/industry-solutions/wind-power/bearing-house>

38. Sandvik Coromant. *CoroBore® 825 – fine boring tool for high precision* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/tools/boring-and-reaming-tools/fine-boring-tools/corobore-825>

39. Sandvik Coromant. *CoroDrill® 430 – solid carbide drill for optimized chip evacuation* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/tools/drilling-tools/solid-carbide-drills/corodrill-430>

40. Sandvik Coromant. *CoroDrill® 860 – solid carbide drill for high productivity* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/tools/drilling-tools/solid-carbide-drills/corodrill-860>

41. Sandvik Coromant. *CoroMill® 316 – exchangeable head milling system* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/tools/milling-tools/exchangeable-head-milling-systems/coromill-316>

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

42. Sandvik Coromant. *CoroMill® 390 – versatile shoulder milling, ramping cutter* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/tools/milling-tools/shoulder-milling-edging-tools/coromill-390>

43. Sandvik Coromant. *CoroMill® 790 – high-performance face milling cutter* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/tools/milling-tools/face-milling-cutters/coromill-790>

44. Sandvik Coromant. *CoroMill® Plura – deburring and chamfering tools* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/tools/milling-tools/solid-end-mills/coromill-plura>

45. Sandvik Coromant. *CoroMill® Plura – solid end mills for high productivity* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/tools/milling-tools/solid-end-mills/coromill-plura>

46. Sandvik Coromant. *CoroReamer® 835 – solid carbide reamers for high-quality surface finish* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/tools/boring-and-reaming-tools/reamers/cororeamer-835>

47. Sandvik Coromant. *CoroTap® 300 – spiral-flute tap for blind holes* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/tools/tapping-tools/spiral-flute-taps/corotap-300>

48. Sandvik Coromant. *Machining recommendations for ISO N materials* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/materials/iso-n>

49. Walter AG. *Perfection in Holemaking. Main Catalogue 2024*. Tübingen, Germany: Walter AG, 2024. 840 p.

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		85

ДОДАТКИ

					<i>КРБ 22-032.00.00.000.ПЗ</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>ДОДАТКИ</i>	<i>Лит.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Вальчишин В.</i>						
<i>Перевір.</i>		<i>Склярів Р.А.</i>					<i>86</i>	
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>		<i>Кодельник В. Р.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Крцпа В.В.</i>						
						<i>ТНТУ ім. І. Пулюя гр. МВ-41, м. Тернопіль</i>		