

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Модернізація приводу головного руху токарного верстата з ЧПК для комплексної обробки валів

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи МВ-41 спеціальності

133 «Галузеве машинобудування»

(шифр і назва спеціальності)

		Демедюк В.Г.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник		Волошин В.Н.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль		Кобельник В.Р.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри		Крупа В.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Рецензент		
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

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

Факультет Інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)
Кафедра Конструювання верстатів, інструментів та машин
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Крупа В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва спеціальності)
студенту Демедюку Віталію Григоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Модернізація приводу головного руху токарного верстата з ЧПК
для комплексної обробки валів

Керівник роботи Волошин Віталій Несторович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 23 » 01 2025 року № 4/7-356

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22.06.2025р.
3. Вихідні дані до роботи Креслення деталі, базовий технологічний процес обробки деталі;
конструкторська документація по токарному патронно-центровому верстату з
ЧПК; матеріали по конструкціях приводів головного руху токарних верстатів з ЧПК
4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Аналітичний розділ
2. Технологічний розділ
3. Конструкторський розділ
4. Безпека життєдіяльності, охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
1. Загальний вигляд токарного верстату з ЧПК (1 лист формату А1)
2. Маршрутний технологічний процес механічної обробки валу (1 лист формату А1)
3. Кінематична схема токарного верстату з ЧПК (1 лист формату А1)
4. Шпиндельний вузол токарного верстату з ЧПК (2 листи формату А1)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності			
охорона праці	к.т.н., доцент Окіпний І.Б.		
Нормоконтроль	к.т.н., доцент Кобельник В.Р.		

7. Дата видачі завдання 27.01.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Демедюк В.Г.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Волошин В.Н.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Демедюк В.Г. Модернізація приводу головного руху токарного верстата з ЧПК для комплексної обробки валів. 133 – Галузеве машинобудування; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; м. Тернопіль, 2025 р.

В кваліфікаційній роботі проведено аналіз конструкції основних вузлів токарного верстата з ЧПК та механізмів кутового позиціонування шпинделя, призначено методи обробки поверхонь деталі, розроблено операційну технологію комплексної обробки валу, проведено модернізацію приводу головного руху шляхом введення в його конструкцію гальмівного механізму шпинделя і системи вимірювання його кутового положення з метою його позиціонування при комплексній обробці деталей. Проведено конструкторські розрахунки шпиндельного вузла. Вирішені питання охорони праці та безпеки життєдіяльності.

Ключові слова: комплексна обробка, токарний верстат з ЧПК, привід головного руху, операційна технологія, шпиндель, жорсткість.

Demediuk V.G. Modernization of the main drive of a CNC lathe for comprehensive shaft machining. 133 – Industrial machinery engineering; Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University; Ternopil, 2025.

The qualification work analyzed the design of the main components of the CNC lathe and the mechanisms for angular positioning of the spindle, assigned methods for processing the surfaces of the part, developed an operational technology for complex shaft processing, modernized the main motion drive by introducing into its design a spindle brake mechanism and a system for measuring its angular position for the purpose of positioning it during complex processing of parts. Design calculations of the

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
Розробив	Демедюк В.Г.				Анотація		
Перевірів	Волошин В.Н.						
Н. контр.	Кобельник В.Р.						
Затв.	Крупа В.В.						
						Літ.	Аркуш
						Н	Аркушів
							3
							1
						ТНТУ ім. І. Пулюя, гр. МВ-41, м. Тернопіль	

spindle assembly were carried out. Issues of labor protection and life safety were resolved.

Keywords: complex processing, CNC lathe, main motion drive, operational technology, spindle, stiffness.

					<i>КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1. Характеристика об'єкту виробництва	8
1.2. Призначення та компоновка токарного верстата з ЧПК	9
1.3. Аналіз конструкції основних вузлів токарного верстата з ЧПК	12
1.4. Аналіз конструкції приводів кутового позиціонування шпинделя	18
1.4.1 Призначення приводів кутового позиціонування шпинделя	18
1.4.2. Кутове позиціонування шпинделя від двигуна приводу головного руху	19
1.4.3 Кутове позиціонування шпинделя від окремого сервоприводу	22
1.5. Вибір напрямку розробки та завдання на кваліфікаційну роботу бакалавра	25
2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	27
2.1. Призначення методів обробки поверхонь деталі	27
2.2. Вибір технологічних баз	29
2.3. Вибір металообробного обладнання	29
2.4. Проектування операційної технології обробки деталі на токарному верстаті з ЧПК	30
2.5. Вибір різального та допоміжного інструментів для обробки на токарному верстаті з ЧПК	31
2.6. Вибір контрольно-вимірювального інструменту	33
2.7. Вибір режимів різання для комплексної операції з ЧПК	34
3. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	37
3.1. Структура модернізованого приводу головного руху із кутовим позиціонуванням шпинделя	37

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата								
Розробив	Демедюк В.Г.				Зміст				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевірів	Волошин В.Н.								Н		5	2
Н. контр.	Кобельник В.Р.											
Затв.	Крупа В.В.								ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м. Тернопіль			

3.2.	Кінематичний розрахунок модернізованого приводу головного руху та вибір електродвигуна	38
3.3.	Проектування шпиндельного вузла приводу головного руху	40
3.3.1.	Вибір переднього кінця та компоновальної схеми шпиндельного вузла	40
3.3.2.	Вибір опор шпиндельного вузла	41
3.3.3	Розрахунок осьової жорсткості шпиндельного вузла з використанням пакета прикладних програм MathCAD	42
3.3.4	Розрахунок радіальної жорсткості шпиндельного вузла, як статично невизначеної системи, з використанням пакету прикладних програм MathCAD	45
3.4.	Розроблення конструкції механізму кутового позиціонування шпинделя	56
4.	БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	60
4.1.	Інструкція з техніки безпеки при роботі на токарному верстаті з ЧПК	60
4.2.	Розроблення заходів з безпеки життєдіяльності при роботі на токарному верстаті з ЧПК	62
	ВИСНОВКИ	67
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	69
	ДОДАТКИ	72

ВСТУП

На більшості деталей типу тіл обертання є додаткові поверхні (лиски, площини, пази, позацентрові отвори та ін.), які потребують фрезерування під різними кутами та обробки осьовим інструментом. Тому комплексна обробка таких деталей на одному верстаті має багато переваг, серед яких підвищення продуктивності та точності, зменшення кількості використовуваного обладнання.

Виконання таких додаткових операцій на токарних верстатах з ЧПК вимагає кутового позиціонування та фіксації шпинделя. Окрім того, інструментальні системи таких верстатів повинні бути оснащені приводами обертання інструменту.

Шпиндельний вузол повинен працювати у двох режимах. При обробці поперечних або поздовжніх площин, позацентрових отворів, шпонкових пазів і т.д. використовується режим повороту шпинделя на певний кут і жорстка фіксація. При контурній обробці поверхонь (фасонних пазів, профілів кулачків та ін.) шпиндель повинен здійснювати неперервну колову подачу.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена модернізації приводу головного руху токарного верстата з ЧПК для комплексної токарної обробки. У кваліфікаційній роботі це реалізується шляхом введення в конструкцію гальмівного механізму шпинделя та системи вимірювання його кутового положення. Такі пристрої забезпечують фіксоване або неперервне кутове позиціонування шпинделя з використання двигуна приводу головного руху. Завдяки цьому істотно підвищиться продуктивність обробки деталі та скоротиться виробничий цикл.

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Вступ		
Розробив	Демедюк В.Г.						
Перевірів	Волошин В.Н.						
Н. контр.	Кобельник В.Р.						
Затв.	Крупа В.В.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів
					Н	7	1
					ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м. Тернопіль		

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Характеристика об'єкту виробництва

Деталь «Вал» (рис. 1.1) є тілом ступінчатої циліндричної форми та входить до складу циліндричного редуктора загального призначення. Вона служить для передачі крутного моменту від зубчатого колеса через пасову передачу до робочої машини. Деталь «Вал» є ступінчатим та складається із п'яти ділянок. Дві ділянки валу з Ø80 мм служать для встановлення внутрішніх кілець підшипників. Ділянка валу Ø85,5 мм служить для встановлення на ній зубчатого колеса. Вихідний кінець валу Ø60,5 мм служить для встановлення шків пасової передачі. На ділянці валу Ø85,5 мм виконаний шпонковий паз, який служить для встановлення призматичної шпонки, що взаємодіє із зубчатим колесом. На вихідному кінці Ø60,5 мм також виконаний шпонковий паз, який служить для встановлення призматичної шпонки, що взаємодіє із шківом.

На кресленні деталі «Вал» приведена наступна інформація: матеріал та маса деталі; технічні вимоги до точності розмірів; технічні вимоги до форми та взаємного розташування поверхонь; вимоги щодо якості поверхонь.

В результаті якісної оцінки деталі на технологічність можна зробити такі висновки. Матеріал деталі – якісна конструкційна сталь 35 ГОСТ 1050-88, яка повністю відповідає умовам експлуатації деталі та вимогам щодо міцності зносостійкості та витривалості.

На деталі немає важкодоступних місць для обробки, тому можна використовувати стандартний різальний та вимірювальний інструмент. Форми поверхонь (в основному – поверхні обертання) не представляють складності для механічної обробки.

Деталь «Вал» відноситься до довгих валів [1], має достатню жорсткість, тому

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата								
Розробив	Демедюк В.Г.				Аналітичний розділ				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевірів	Волошин В.Н.								Н		8	19
									ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м.Тернопіль			
Н. контр.	Кобельник В.Р.											
Затв.	Крупа В.В.											

при механічній обробці на технологічному обладнанні не потрібно використовувати додаткових підтримуючих пристроїв. Квалітети точності розмірів, класи шорсткості поверхонь деталі «Вал» дозволяють вести чистову токарну обробку на верстатах підвищеної точності. Для забезпечення точності розмірів і шорсткості поверхонь двох ділянок валу з $\varnothing 80p6$ необхідно використати круглошліфувальний верстат.

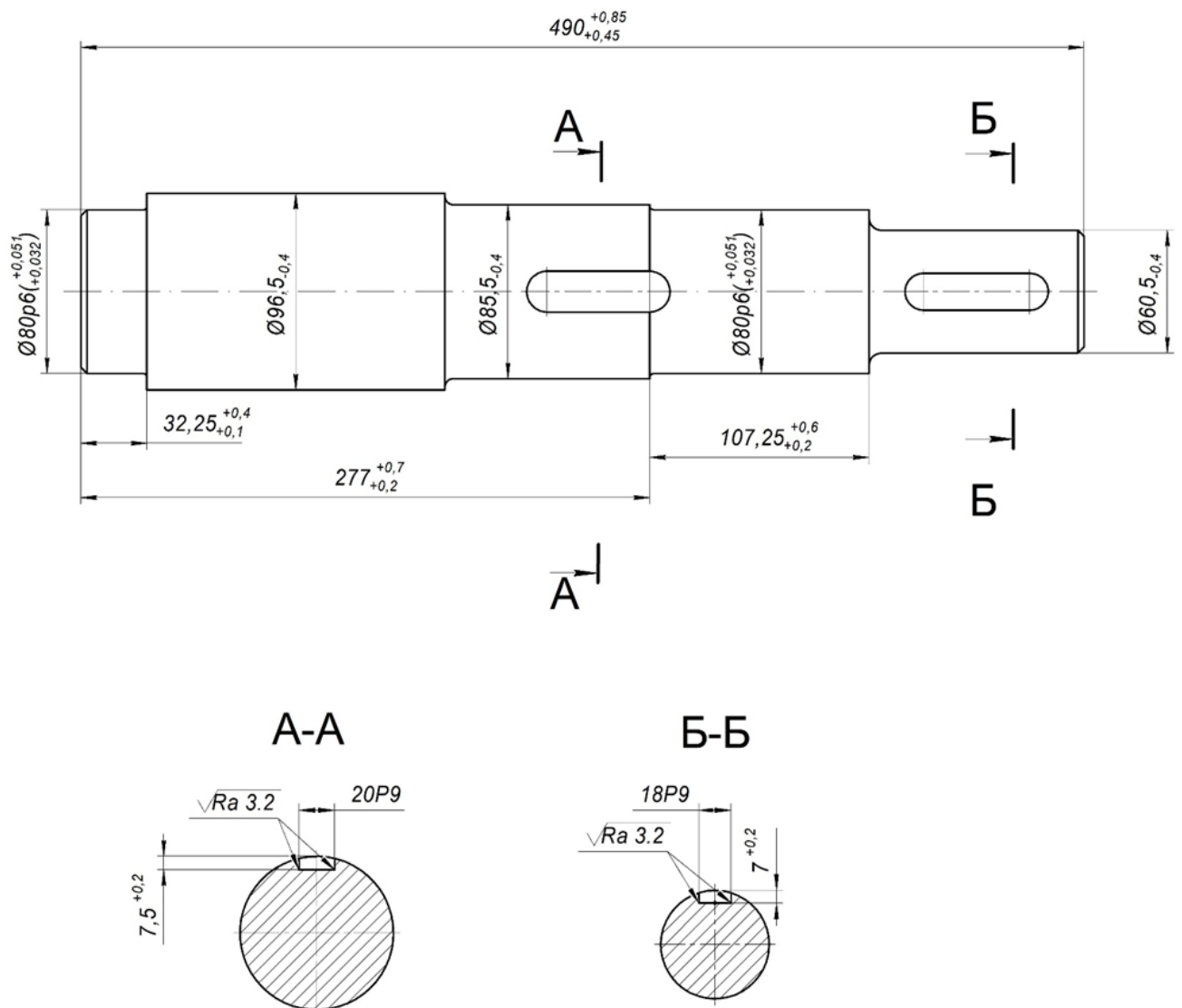


Рисунок 1.1 – Креслення деталі «Вал»

1.2. Призначення та компоновка токарного верстата з ЧПК

Токарний верстат з ЧПК з горизонтальним шпинделем мод. SPU 40 CNC (рис. 1.2) фірми MAS (Чехія) призначений для токарної обробки в автоматичному

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		9

та напівавтоматичному циклі деталей типу валів, фланців, а також токарної обробки деталей з прутка [2]. Максимальний діаметр обробки – 400 мм, максимальний діаметр обробки пруткового матеріалу – 80 мм та максимальна довжина обробки – 2500 мм. Верстат призначений для роботи в умовах дрібносерійного та серійного машинобудівного виробництва. Клас точності верстата – П. Верстат оснащений системою ЧПУ SIEMENS SINUMERIK 840D. SIN 840 D.



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд токарного верстата з ЧПК мод. SPU 40 CNC

Компоновка основних вузлів і механізмів токарного верстата з ЧПК мод. SPU 40 CNC приведена на рис. 1.3.

Нахилена під кутом до вертикальної осі чавунна станина 10 із загартованими напрямними є основним базовим вузлом верстата. З лівої сторони станини прикріплена передня бабка 15. Зверху на передній бабці розташований пристрій 6 приводу позиціонування шпинделя по осі «С». Привід головного руху містить асинхронний частотно-регульований електродвигун 13, який розміщений на чавунній консолі, що з'єднана зі станиною. До двигуна приєднана планетарна двоступенева коробка передач 14, з вихідного валу якої рух на шпиндель передається поліклінопасовою передачею. Навпроти шпинделя по напрямних станини може переміщатися по керуючій програмі задня бабка 19.

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

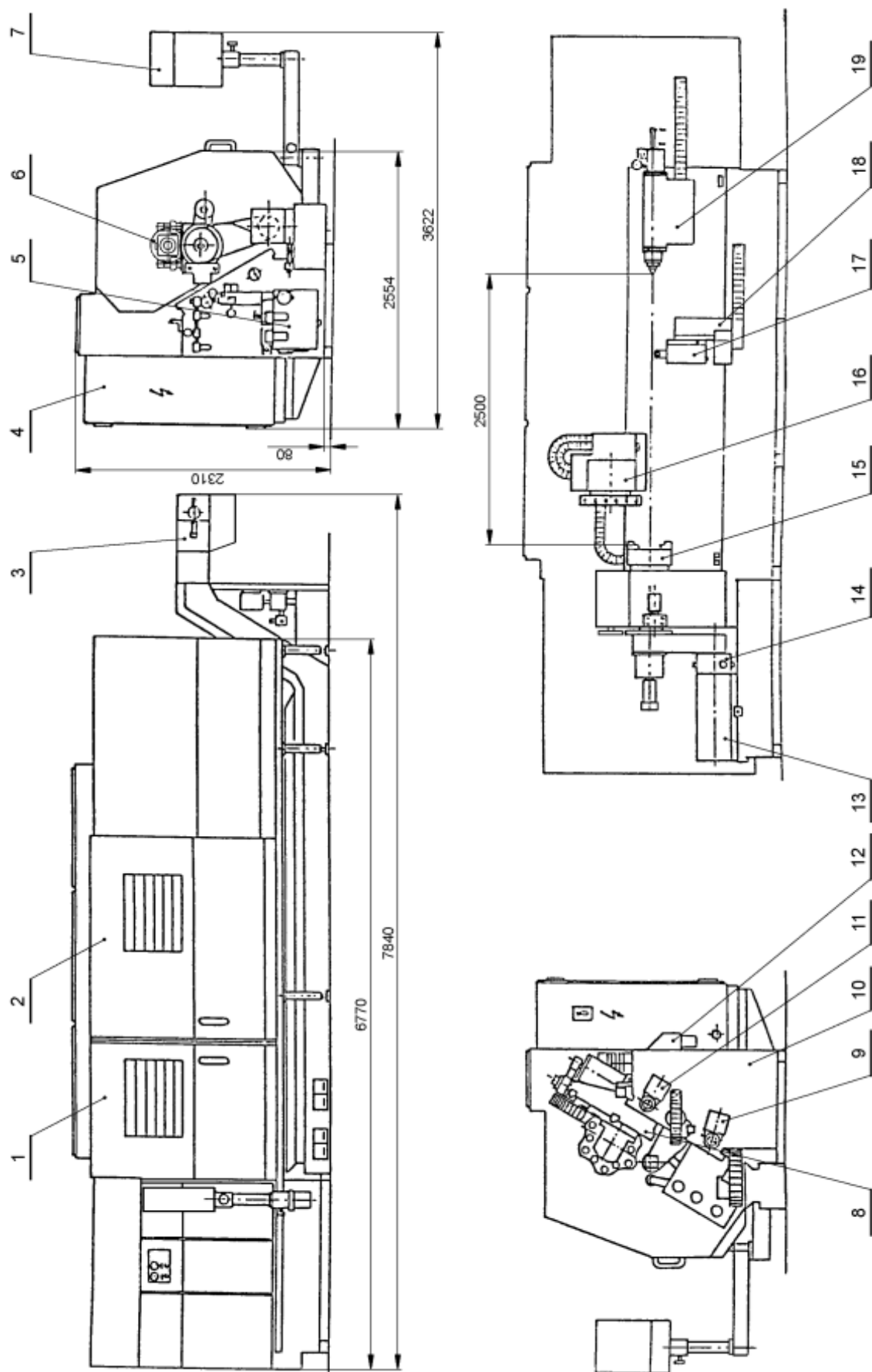


Рисунок 1.3 – Основні вузли і механізми токарного верстата з ЧПК
 мод. SPU 40 CNC

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ

Арк.

11

Поздовжній супорт 8 з поперечним супортом 16 переміщаються по верхній напрямній станини. По нижній напрямній станини переміщаються санчата 18 з люнетом 17 для підтримки довгих деталей. Поздовжнє переміщення супорта і санчат забезпечують електродвигуни подачі 9, 11. Вони розміщені на правій стороні станини.

Біля двигуна приводу головного руху розміщено ємність гідравлічного агрегату 5, яка містить більшість гідравлічної апаратури. Електрошафи 4 із електричним обладнанням розміщені вздовж задньої сторони станини. Агрегат центральної системи змащування 12 також розміщено на задній стороні станини.

Система ЧПК і панель управління 7 розташовані поворотним способом на консолі, з'єднаній зі станиною. Робочий простір верстата закривають пересувні кожухи 1, 2 з вікнами із захисного скла та ґратами. Кожухи можна пересувати за допомогою гідравлічного циліндра або вручну. Видалення стружки з робочого простору здійснюється за допомогою конвеєра стружки 3.

1.3. Аналіз конструкції основних вузлів токарного верстата з ЧПК

Станина та основа верстата. Станина виконана заодно з основою у вигляді литого блоку із сірого чавуну та має жорстку коробчасту форму [2]. На литому блоці виконані опорні поверхні та загартовані напрямні поверхні. Опорні поверхні служать для встановлення передньої бабки, а напрямні поверхні для поздовжнього супорта та санчат люнета, а також задньої бабки. Консоль двигуна приводу головного руху пригвинчена з лівого боку моноблока станини. Консолі для установки електрошафи розташовані на задній стінці станини. Нижня поверхня литої станини служить для встановлення верстата на фундамент.

Привід головного руху. Привід головного руху верстата розміщений на чавунній консолі 22, яка приєднана до лівого боку станини (рис. 1.4) [2]. До фланця головного частотно-регульованого асинхронного електродвигуна приєднана планетарна двоступенева коробка передач. Її вихідний вал передає рух на шпindel за допомогою поліклінопасової передачі.

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

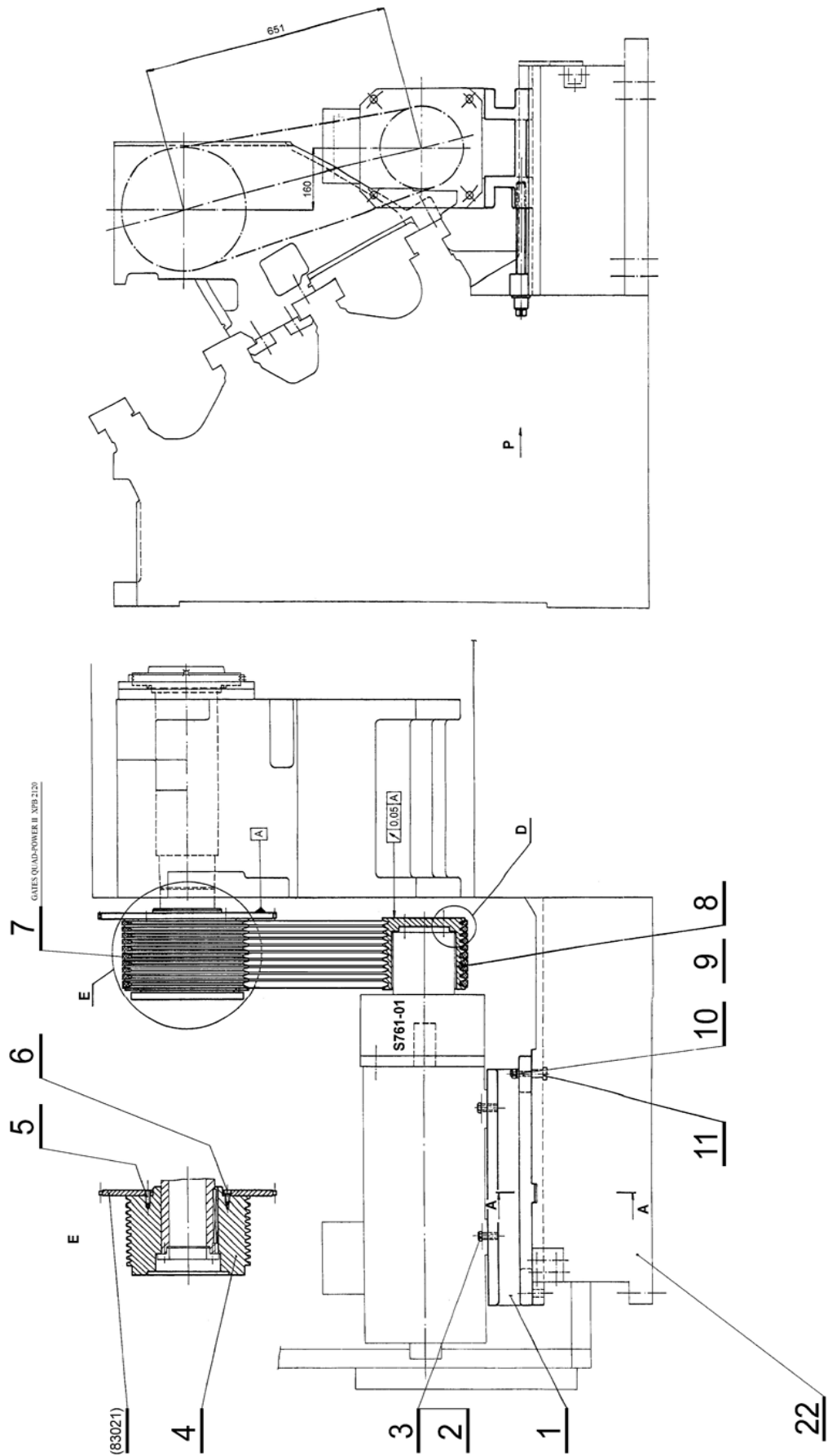


Рисунок 1.4 – Привід головного руху токарного верстата з ЧПК
мод. SPU 40 CNC

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ

Перемикання передач у коробці швидкостей виконується автоматично за допомогою електрогідравлічного пересувного пристрою.

Двоступенева коробка швидкостей є двоступеневою і приєднана до фланця головного асинхронного двигуна головного приводу та становить з ним один блок (рис. 1.5) [2]. Перемикання ступенів здійснюється електрогідравлічним пристроєм. Перша ступінь має передавальне відношення 1: 3,54, а друга ступінь – 1:1. Механізм перемикання передач виконаний у вигляді гідравлічного блоку, з'єднаний з гідравлічним агрегатом трубками, та приєднаний на бік корпусу коробки. У середньому положенні перемикача механізму перемикання передач передачі руху не відбувається.

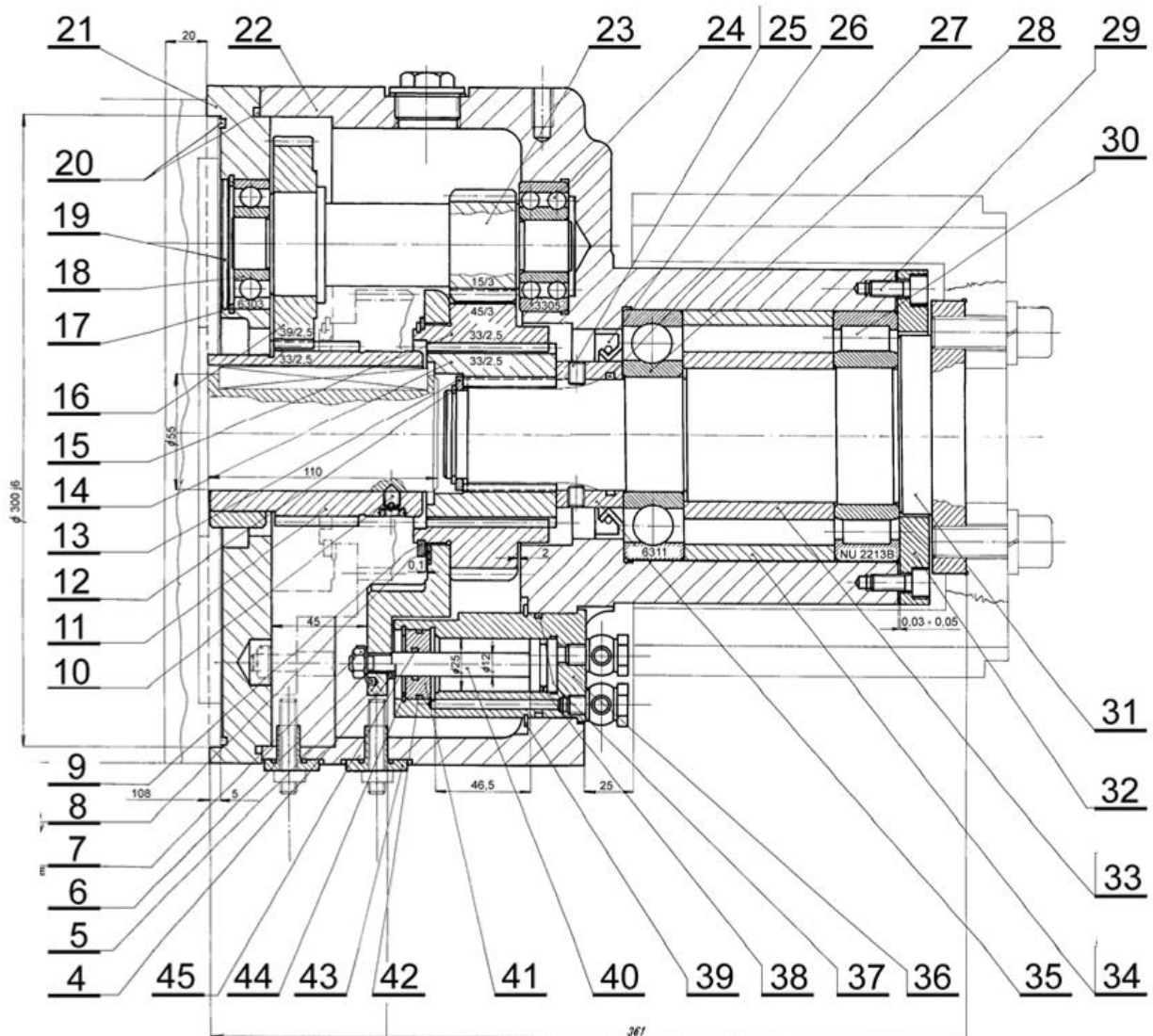


Рисунок 1.5 – Двоступенева коробка швидкостей токарного верстата з ЧПК мод. SPU 40 CNC

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		14

Привід поздовжніх переміщень супорта. Поздовжні переміщення супорта (вісь Z, W) здійснюються за допомогою серводвигуна, розміщеного на правому боці станини (рис. 1.6) [2]. Рух від серводвигуна на гвинт з кроком 20 мм передається через зубчатопасову передачу із передавальним відношенням 1:2.

Гвинт кульково-гвинтової передачі встановлений на двох опорах, які приєднані до станини верстату. Гайка кульково-гвинтової передачі жорстко з'єднана із поздовжнім супортом.

Попередній натяг у кулькових кульково-гвинтовій передачі виконується на двох рівнях: у парі упорних підшипників у місці встановлення гвинта на стороні серводвигуна зазор усувається за допомогою тарілчастої пружини 3 силою близько 2000 Н; для обмеження теплової деформації при робочому навантаженні на протилежному кінці гвинта із силою 12000 Н тарілчасті пружини 36 створюють натяг.

Натяг пасу здійснюється від натяжного болта, за допомогою якого переміщається установочна плита для серводвигуна.

Вимірювання переміщень по осі Z (W) здійснюється за допомогою імпульсного датчика положення. Цей датчик обертового типу розташований безпосередньо на серводвигуні приводу подач по осі Z (W).

Привід поперечних переміщень супорта. Переміщення по осі X здійснюється за допомогою кульково-гвинтової передачі із приводом від серводвигуна (рис. 1.7) [2]. Рух від серводвигуна на гвинт з кроком 10 мм зубчатопасовою передачею. Гвинт переміщує гайку, яка жорстко з'єднана із поперечним супортом. Вибір зазору між шківками та валом серводвигуна і гвинтом забезпечують стяжні втулки. Натяг пасу здійснюється аналогічно, як і у приводі поздовжніх переміщень.

Гвинт кульково-гвинтової передачі встановлюється в попередньо натягнутих радіально-упорних підшипниках мод. ZARN фірми INA (Німеччина).

Переміщення по осі X вимірюється за допомогою лінійного оптоелектричного датчика фірми HEIDENHAIN (Німеччина).

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

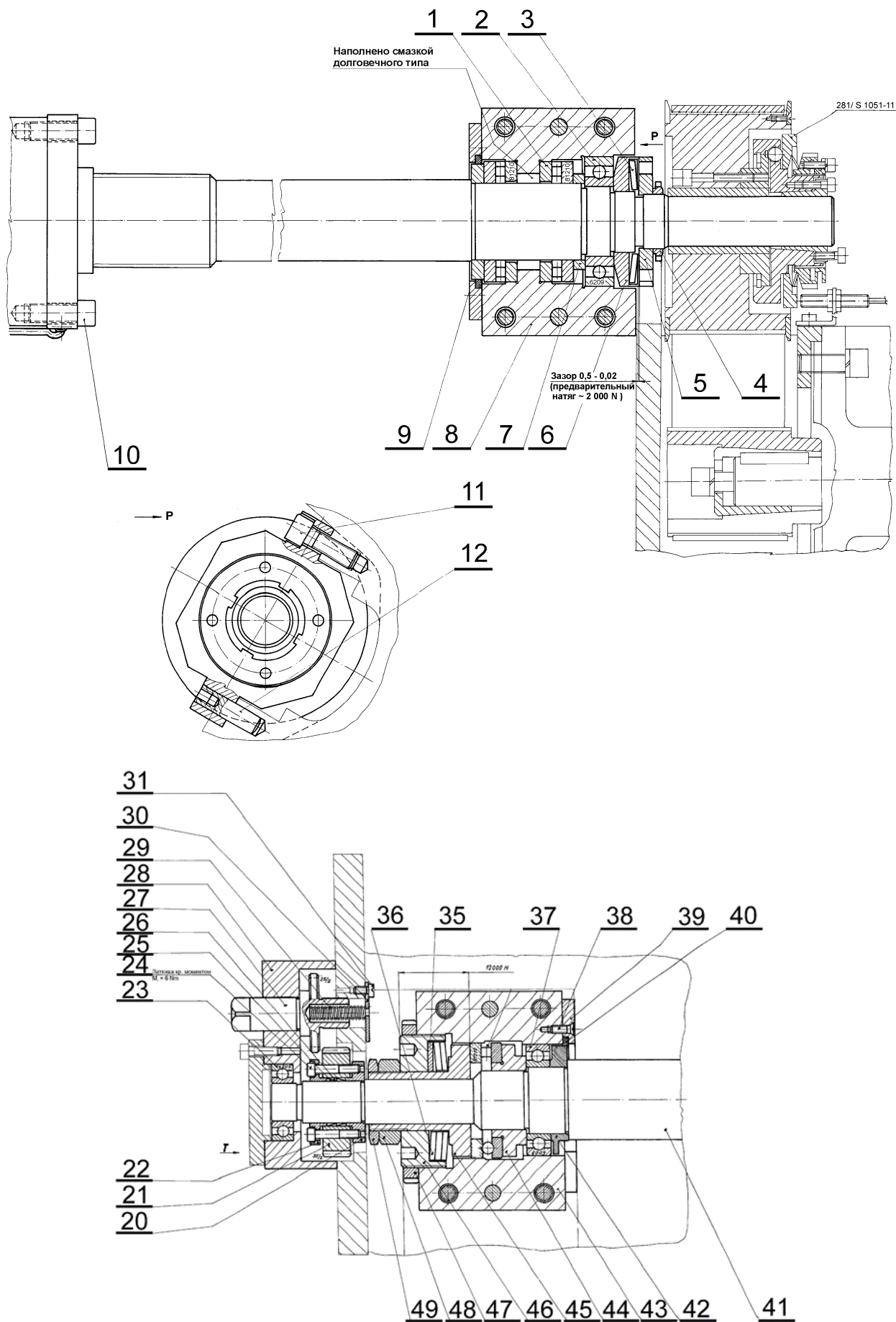


Рисунок 1.6 – Привід поздовжніх переміщень супорта токарного верстата з ЧПК мод. SPU 40 CNC

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		16

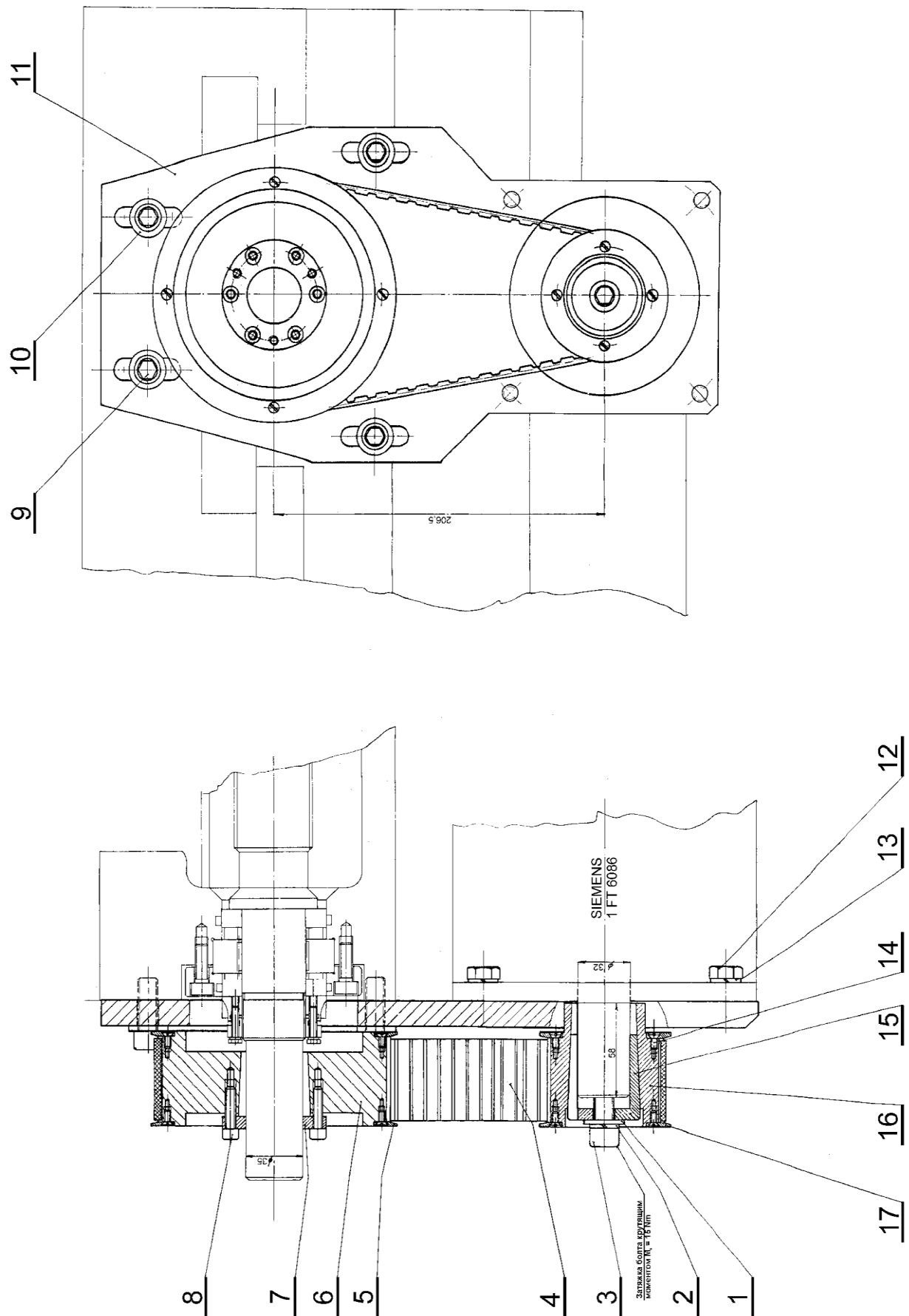


Рисунок 1.7 – Привід поперечних переміщень супорта токарного верстата з ЧПК
мод. SPU 40 CNC

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ

Арк.

17

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Виконання таких операцій можливе на токарних верстатах з ЧПК, які оснащені шпинделем з приводом його кутового позиціонування (привід полярної координати С) із відповідним блоком управління, а також приводами обертання інструменту, вмонтованими в інструментальні системи (револьверні головки, окремі шпиндельні вузли та ін.) [3-7]

Привід позиціонування шпинделя залежно від умов обробки повинен забезпечувати або позиційний поворот (механізм ділення) з дискретністю $1...2^\circ$, або безперервний поворот (керування) з дискретністю приблизно $0,001^\circ$ із частотою обертання $0,2...0,25 \text{ хв}^{-1}$ [3-7].

Перший режим використовується при обробці поздовжніх або поперечних площин, позацентрових отворів, шпонкових пазів т.д. В даному випадку шпиндель повертається на певний кут та для подальшої обробки жорстко фіксується [3-7].

Другий режим використовується для контурної обробки поверхонь фасонних пазів, профілів кулачків на деталі та інших складних поверхонь. У цьому випадку привод повинен забезпечувати також і можливість дискретного повороту на заданий кут [3-7].

1.4.2. Кутове позиціонування шпинделя від двигуна приводу головного руху

Принципова схема приводу, що забезпечує режим звичайної токарної обробки, так і режими позацентрового свердління і фрезерування представлена на рис. 1.9 [3-7]. В режимі кутового позиціонування шпиндель індексується зазвичай із дискретністю $1...2,5^\circ$ (точність $\pm 0,01^\circ$, повторюваність $\pm 0,005^\circ$). Фіксація необхідного положення шпинделя 1 здійснюється за допомогою спеціального, консольно-розташованого зубчастого колеса 2 і зубчастого сектора (секторів) 3, що переміщається від гідроциліндра 4. Кутове положення шпинделя може контролюватися наступними способами: за допомогою кругового датчика, вбудованого в електродвигун 5, який зв'язаним з шпинделем пасовою передачею

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

6; за допомогою датчика різьбонарізання верстата. Розглянутий привід не забезпечує режим контурної обробки.

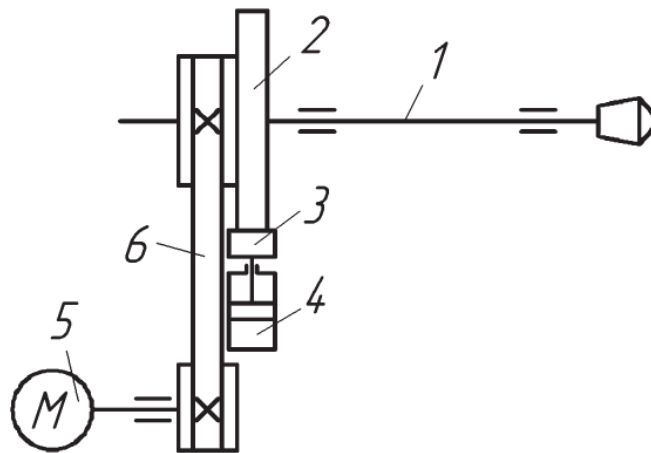


Рисунок 1.9 – Привід позиціювання шпинделя, що забезпечує тільки кутове позиціювання

Принципова схема однодвигунного приводу шпинделя 1 приведена на рис. 1.10 [3-7]. Такий привід забезпечує окрім головного руху режим контурної обробки в поєднанні з лінійними координатами. Положення шпинделя при обробці поверхонь деталі контролюється роторним датчиком зворотного зв'язку 5 зв'язку (датчиком різьбонарізання). Двигун 3 передає рух на шпиндель через зубчасту 2-7 і пасову 4 передачі. Електромагнітне гальмо 6 працює у двох режимах: для вибірки в один бік зазорів у кінематичних елементах приводу при контурній обробці (режим підгальмовування); позиціювання шпинделя в заданому положенні (режим фіксації).

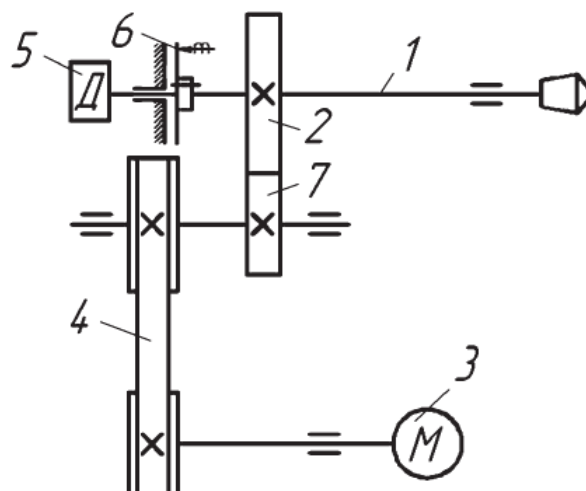


Рисунок 1.10 – Привід позиціювання шпинделя, що забезпечує кутове позиціювання та безперервне повертання

Конструкція шпиндельного вузла приводу позиціювання шпинделя, що забезпечує кутове позиціювання та безперервне повертання від двигуна приводу головного руху приведена на рис. 1.11 [7].

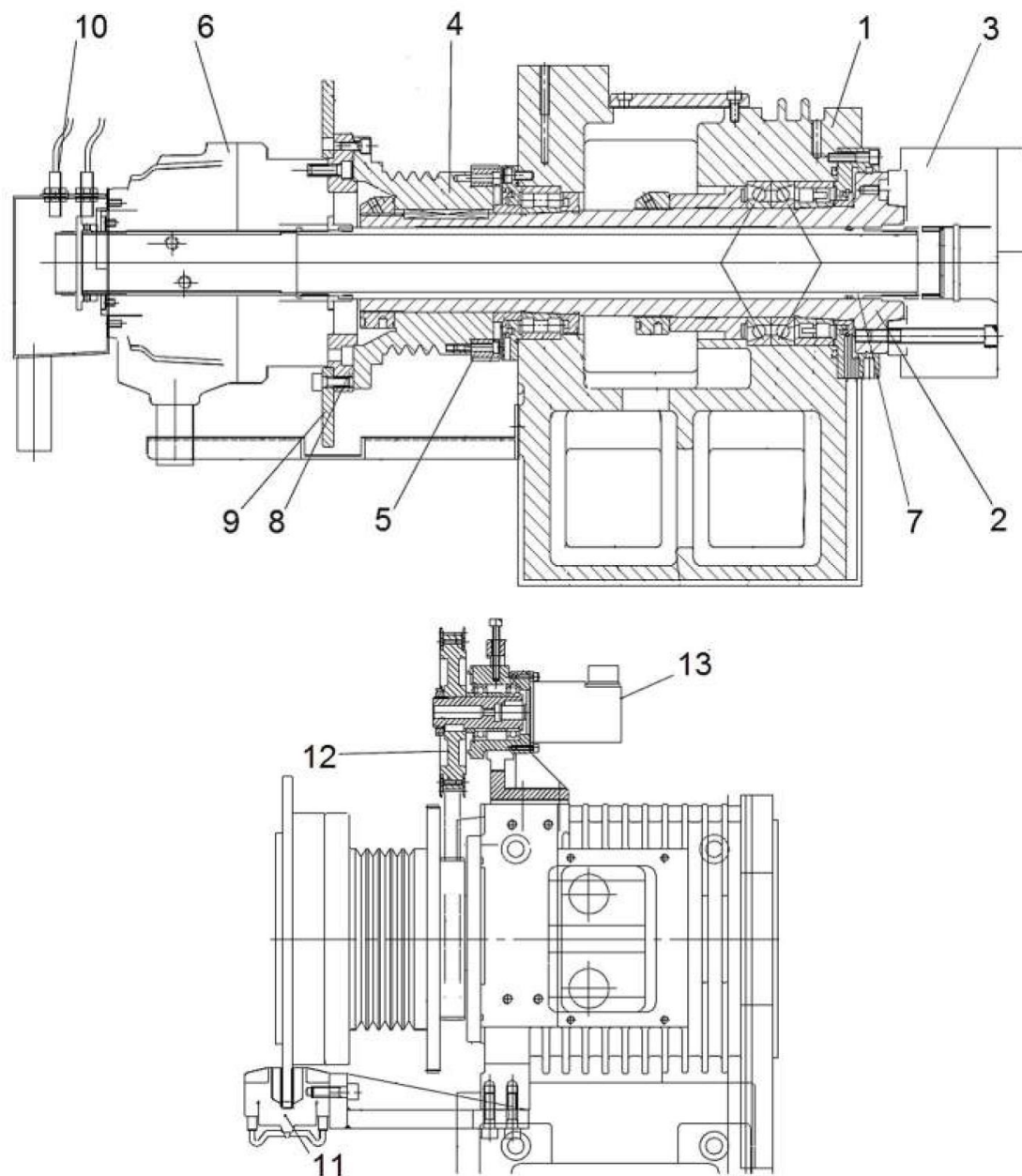


Рисунок 1.11 – Конструкція шпиндельного вузла із гальмівним пристроєм та датчиком положення шпинделя

Такі шпиндельні вузли оснащуються гальмівним пристроєм. Він пристрій включає в себе диск 9, закріплений на приводному шківі 4 через перехідник 8. Шків 4 встановлений на задньому кінці шпинделя 2. На корпусі шпиндельної бабки 1 за допомогою кронштейна закріплені два гідроциліндри гальма 11. Вони

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ

Арк.

21

розміщені симетрично з двох боків гальмового диска. Через гідропанель від системи керування здійснюється керування роботою гідроциліндрів. Для контролю кутового положення шпинделя використовується датчик положення 13 обертового типу. Пух на нього передається від шпинделя зубчастою пасовою передачею зі шківів 5 на шків 12 на валу датчика Шків 5 закріплений на привідному шківі шпинделя 2.

1.4.3. Кутове позиціонування шпинделя від окремого сервоприводу

У токарних верстатах з ЧПК середнього та великого розмірів застосовуються зазвичай дводвигунні приводи шпинделя [3-6]. У цьому випадку для традиційних токарних операцій використовується потужний двигун, а для кутового позиціонування шпинделя менш потужний електродвигун, як правило серводвигун [3-6]. На відміну від конструкцій, приведених у п. 1.4.2. такий привід забезпечує високу надійність і точність, але складніший. Включення-відключення приводу позиціонування шпинделя може здійснюватися: за допомогою електромагнітних або зубчастих муфт, що працюють за командами пристрою ЧПУ; зчепленням-розчепленням кінематичних пар, що забезпечують зв'язок додаткового двигуна зі шпинделем верстата.

Принципова схема дводвигунного приводу обертання шпинделя 7 приведена на рис. 1.12 [3-7]. Привід позиціонування шпинделя здійснюється від регульованого електродвигуна 2, який містить датчик 1 кутового положення ротора, через циліндричні зубчасті колеса 3-4 і 5-6. Головний рух шпинделя забезпечується регульованим електродвигуном 8 через пасову передачу 9. Шпиндель оснащений гальмівним пристроєм 10, а також датчиком кутового положення 11. Вмикання-відключення режиму позиціонування шпинделя здійснюється за допомогою пересувного в осьовому напрямку зубчатого колеса 5, що переміщується окремим приводом по команді пристрою ЧПУ. Наявність датчиків 1 і 11 дозволяє контролювати кутове положення зубчатих коліс 5 і 6. Такий контроль виключає можливість «втискання» їх зубів при включенні приводу позиціонування шпинделя.

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Гальмо 10 служить для фіксації шпинделя в режимі позиціювання. Воно також забезпечує вибірку зазорів у ланцюзі приводу координати С, працюючи в режимі «підгальмовування».

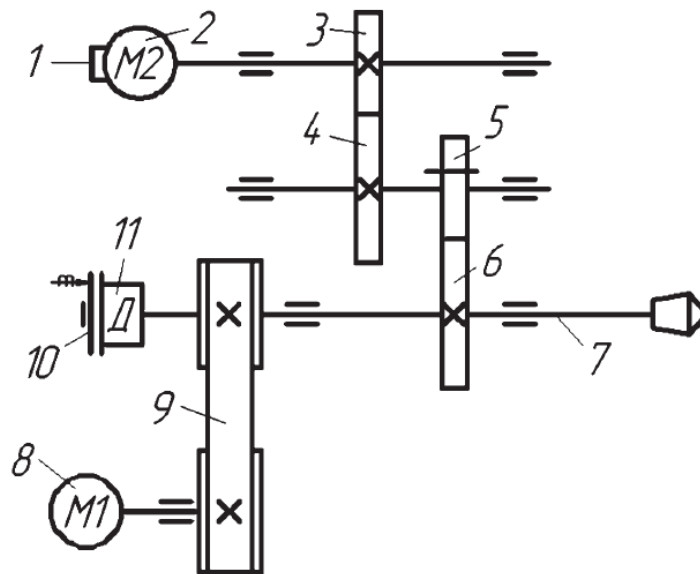


Рисунок 1.12 – Привід позиціювання шпинделя від серводвигуна із ковзною шестернею, що забезпечує кутове позиціювання та безперервне повертання

Конструкція приводу кутового позиціювання шпинделя від серводвигуна приведена на рис. 1.13. За допомогою гідроциліндра 14 корпус редуктора 3 повертається відносно важеля 4. Важіль 4 жорстко зв'язаний з віссю 5, що зафіксована на кронштейні 6. Кронштейн 6 закріплений на корпусі шпиндельної бабки 1. При цьому колесо 11 зачіпляється з 10 колесом, розташованим на шпинделі. За допомогою датчика різьбонарізання контролюються кутове положення шпинделя, а датчика 7 та кутове положення валу редуктора. Це робиться з метою забезпечення можливості зачеплення коліс 11 та 10. Пружина 15 забезпечує гарантоване відключення приводу позиціювання шляхом розчеплення коліс 10 і 11 при відключенні гідроприводу. Кінцевими вимикачами контролюються увімкнене та вимкнене положення. Від регульованого двигуна постійного струму, закріпленого на плиті 2, здійснюється повільне слідкуюче обертання шпинделя. Плита 2 зв'язана з корпусом редуктора 3. Серводвигун з'єднується з редуктором зубчастою пасовою передачею ($i = 1/2$). На входному валу редуктора за допомогою беззазорного з'єднання зафіксовано шків 13.

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

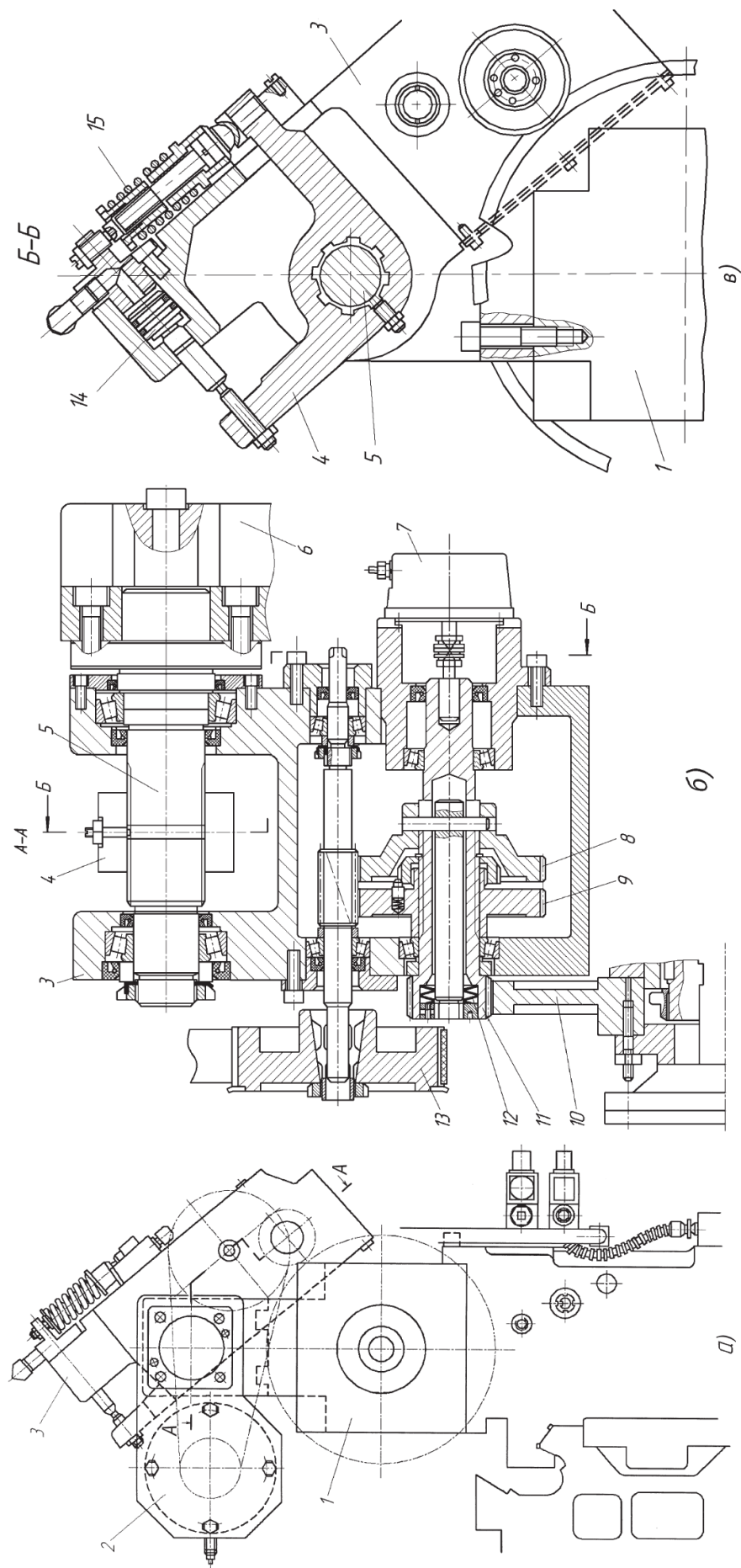


Рисунок 1.13 – Конструкція приводу позиціювання шпинделя від серводвигуна

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ

Арк.

24

Далі обертання передається через косозубу циліндричну передачу. Вибір зазору в цій передачі відбувається за допомогою тарілчастих пружин 12 які зміщують колеса 8 і 9 одне відносно одного. Тиском масла гідроциліндра 14 забезпечується радіальне зусилля з'єднання шестерень 10, 11.

1.5. Вибір напрямку розробки та завдання на кваліфікаційну роботу бакалавра

Комплексна обробка деталей типу тіл обертання на одному токарному верстаті з ЧПК за одну установку дозволяє: істотно підвищити точність і продуктивність обробки; скоротити виробничий цикл; забезпечити підвищення загального рівня автоматизації технологічних процесів; забезпечити швидке переналагодження при переході на обробку іншої деталі [3-7]. Така комплексна обробка вимагає відповідних приводів головного руху із забезпеченням фіксованого та неперервного кутового позиціювання шпинделя.

Окрім того, токарна обробка сучасним різальним інструментом характеризуються високими частотами обертання шпинделя і значною потужністю, які повинні забезпечити приводи головного руху [3-7]. В якості приводних двигунів приводів головного руху токарних верстатів з ЧПК все частіше використовуються асинхронні регульовані електродвигуни змінного струму [3-7].

Останні моделі таких електродвигунів провідних закордонних фірм мають малі габаритні розміри та масу і можуть забезпечити розширений діапазон регулювання частоти обертання при постійній потужності. Вони також можуть забезпечити обертання шпинделя в режимі позиціювання чи кругової подачі при відповідному керуванні. Це стало можливим завдяки високій точності обертання валу електродвигуна в області низьких частот обертання. [3-7].

Метою роботи є модернізації приводу головного руху токарного верстата з ЧПК для комплексної токарної обробки шляхом введення в конструкцію гальмівного механізму шпинделя та системи вимірювання його кутового

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

положення для забезпечення фіксованого та неперервного кутового позиціювання шпинделя використанням двигуна приводу головного руху. Завдяки цьому істотно скоротиться виробничий цикл та продуктивність обробки деталі.

Основні завдання:

1. Проаналізувати вимоги, які ставляться до виготовлення довгого ступінчастого валу.
2. Описати призначення, компоновку токарного патронно-центрового верстата з ЧПК мод. SPU 40 CNC. Провести аналіз конструкції його вузлів і механізмів.
3. Провести аналіз конструкції приводів кутове позиціювання шпинделя від двигуна приводу головного руху та від окремих серводвигунів.
4. Розробити технологічний процес та операційну технологію комплексної обробки ступінчастого довгого валу на токарному патронно-центровому верстаті з ЧПК.
5. Обґрунтувати та вибрати різальний, допоміжний та контрольно-вимірювальний інструменти для токарної операції з ЧПК. Провести вибір режимів різання по переходах технологічної операції.
6. Провести кінематичний розрахунок приводу. Вибрати двигун приводу головного руху. Провести розрахунок шпиндельного вузла на жорсткість з використанням пакетів прикладних програм.
7. Розробити конструкцію сервоприводу для забезпечення фіксованого та неперервного кутового позиціювання шпинделя.
8. Передбачити заходи по охороні праці та безпеці життєдіяльності.

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		26

2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1. Призначення методів обробки поверхонь деталі

Квалітети точності розмірів, а також схеми базування оброблюваної деталі визначають порядок механічної обробки окремих поверхонь [8-12].

На рис. 2.1 приведена нумерація поверхонь, які необхідно обробити. Послідовність механічної обробки поверхонь приведена в табл. 2.1.

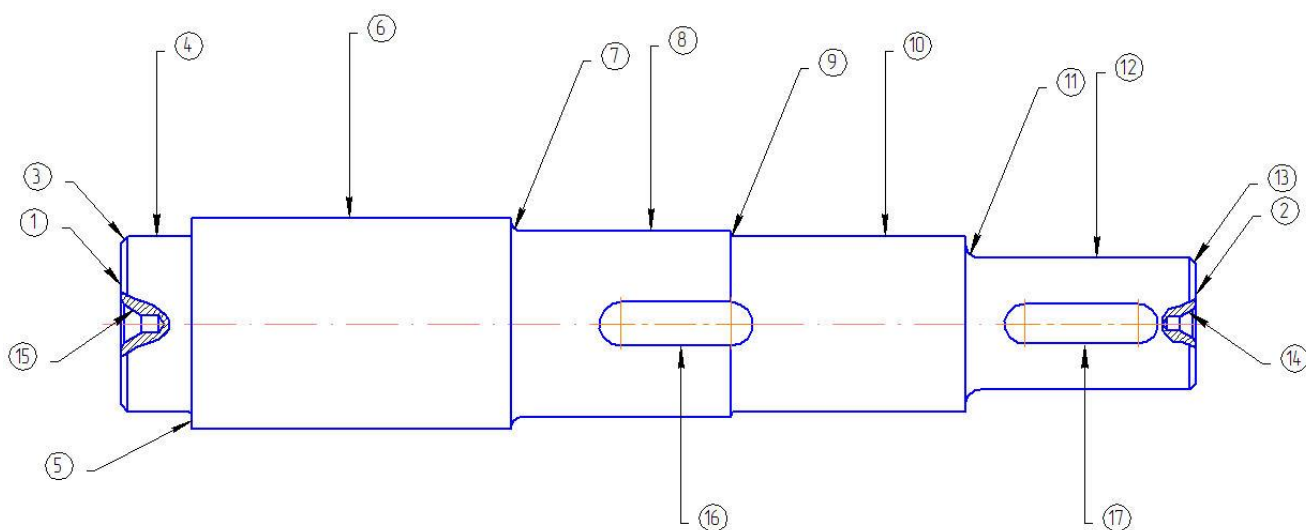


Рисунок 2.1 – Оброблювані поверхні деталі «Вал»

Таблиця 2.1. Послідовність обробки поверхонь

№ операції	Назва технологічної операції	Зміст технологічної операції
010	Фрезерно-центрувальна	Фрезерування торців (поверхні 1, 2) та обробка центрових отворів (поверхні 14, 15)
020	Токарна з ЧПК	Чорнова обробку зовнішніх циліндричних поверхонь деталі (поверхні 3, 4, 5, 6),

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Технологічний розділ		
Розробив	Демелюк В.Г.						
Перевірів	Волошин В.Н.						
Н. контр.	Кобельник В.Р.						
Затв.	Крупа В.В.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів
					Н	27	10
					ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м. Тернопіль		

		Чистове точіння циліндричних поверхонь деталі (поверхні 3, 4, 5, 6)
030	Комплексна з ЧПК	Чорнове точіння зовнішніх циліндричних поверхонь деталі (поверхні 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13). Чистове точіння зовнішніх циліндричних поверхонь (поверхні 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13). Фрезерування двох шпонкових пазів (поверхня 16, 17)
040	Слюсарна	Видалення за допомогою ручного абразивного інструменту задирок і гострих кромek
045	Контрольна	Контроль розмірів деталі після попередніх операцій
050	Термічна	Загартування в індукційній печі нагріванням струмами високої частоти
055	Шліфувальна	Фінішна обробка циліндричних поверхонь, до яких пред'являються високі вимоги по точності обробки, геометрії і шорсткості поверхні виходячи зі службового призначення деталі (поверхні 4, 10, 12).
060	Промивна	Промивання деталей після шліфування (для видалення залишків стружки та абразивного пилу, пов'язаних залишками емульсії використаної при шліфуванні деталі)
070	Контрольна	Здійснюється на контрольній ділянці для контролю точності і якості поверхонь.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ

Арк.

28

2.2. Вибір технологічних баз

При виборі технологічних установочних баз на різному технологічному обладнанні враховано зазначені на кресленні деталі допустимі взаємного розташування поверхонь та відхилення від правильних геометричних форм [8-12]. При цьому було дотримано основні принципи базування – сталість та поєднання конструкторських, технологічних і вимірювальних баз [8-12].

Схема базування для операцій 020, 025, 030, 055 технологічного процесу в центрах приведена на рис. 2.2.

Подвійна напрямна база позначена цифрами 1,2,3,4. Вона обмежує переміщення заготовки вздовж осей OX і OZ , а також поворот навколо цих осей. Обмеження переміщення заготовки вздовж осі OY забезпечує опорна база, яка позначена цифрою 5. Обмеження повороту заготовки навколо осі OY здійснюється завдяки опорній базі, що позначена цифрою 6

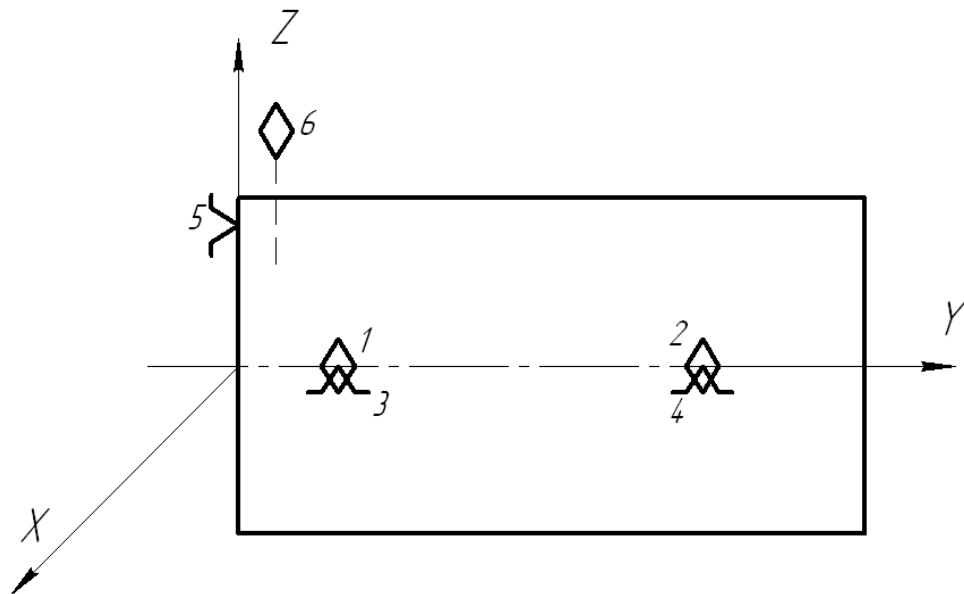


Рисунок 2.2 – Схема базування для операцій 020, 025, 030, 055 в центрах

2.3. Вибір металообробного обладнання

Згідно рекомендацій [8-12] здійснюємо вибір технологічного обладнання. Результати вибору записуємо у табл. 2.2.

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 2.2. Технологічне обладнання для реалізації технологічного процесу

	Назва операції	Назва і модель металорізального верстату
010	Фрезерно-центрувальна	Фрезерно-центрувальний напівавтомат мод. МР-71М
020	Токарна з ЧПК	Токарний патронно-центровий верстат з ЧПК мод. 16А20Ф3
030	Комплексна з ЧПК	Токарний патронно-центровий верстат з ЧПК мод. SPU 40 CNC
055	Шліфувальна	Круглошліфувальний напівавтомат мод. 3М151

2.4. Проектування операційної технології обробки деталі на токарному верстаті з ЧПК

На основі технологічних можливостей токарного верстата з ЧПК мод. SPU 40 CNC та проведеного аналізу обробки поверхонь запропоновано варіант операційної технології обробки ступінчастого довгого валу, який приведений у табл. 2.3.

Таблиця 2.3. Операційна технологія обробки валу

№ з/п	Схема обробки	Перехід
1	Technical drawing of a stepped shaft. The shaft has four main sections with diameters: $\varnothing 87_{-0,6}$, $\varnothing 81_{-0,5}$, $\varnothing 61_{-0,6}$, and a final section with a $2 \times 45^\circ$ chamfer. Surface finish requirements are indicated: $\sqrt{Ra} 12,5$ for the first three sections and $\sqrt{Ra} 6,3$ for the final section. Dimension lines indicate lengths: 181 (+0,7 / +0,3), 127 (+0,7 / +0,4), and 109 (+0,9 / +0,3). Circled numbers 1 through 7 mark specific points on the shaft. A small detail shows a 5x1,3 hole.	Точити начорно по керуючій програмі поверхні витримуючи розміри 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

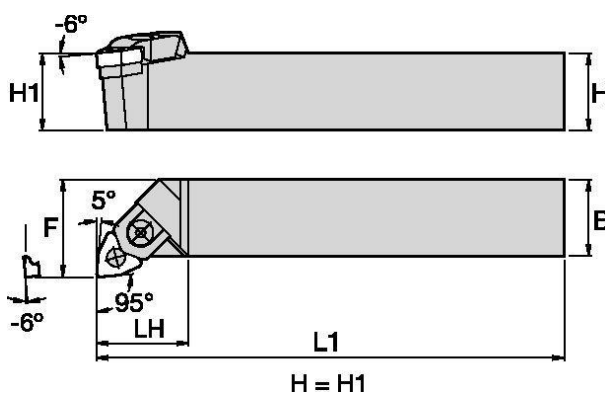
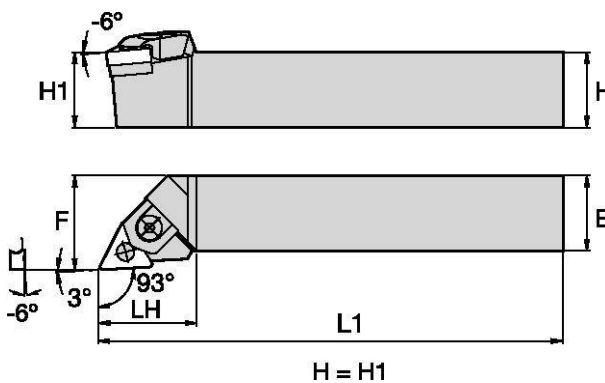
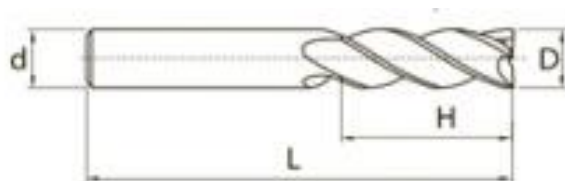
2		Точити начисто по керуючій програмі циліндричні поверхні витримуючи розміри 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
3		1. Фрезерувати шпонковий паз витримуючи розміри 1, 2, 6 2. Фрезерувати шпонковий паз витримуючи розміри 3, 4, 5

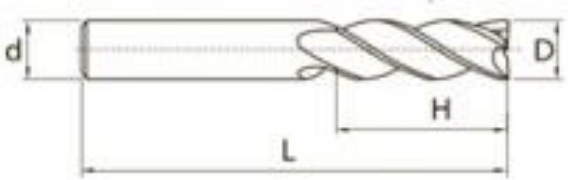
2.5. Вибір різального та допоміжного інструментів для обробки на токарному верстаті з ЧПК

Згідно рекомендацій [13] проведено вибір різального та допоміжного інструментів. Результати вибору записуємо у таблицю 2.4.

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31

Таблиця 2.4. Вибраний різальний та допоміжний інструменти

Перехід	Різальний інструмент	Допоміжний інструмент
Точити начорно по керуючій програмі поверхні витримуючи розміри 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	Різець Kennametal MWLNR3225P08H4 	Державка для різця спеціальна
Точити начисто по керуючій програмі циліндричні поверхні витримуючи розміри 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	Різець Kennametal MTJNR3225P22H4 	Державка для різця спеціальна
Фрезерувати шпонковий паз витримуючи розміри 1, 2, 6	Фреза для обробки шпонки з циліндричним хвостовиком Ø18 мм 5502R453GM 	1. Оправка цангова 2. Цанга ER32 470E Ø18 мм

Фрезерувати шпонковий паз витримуючи розміри 3, 4, 5	Фреза для обробки шпонки з циліндричним хвостовиком Ø20 мм 5602R453GM 	1. Оправка цангова 2. Цанга ER32 470E Ø20 мм
--	--	--

2.6. Вибір контрольно-вимірювального інструменту

Вибір контрольно-вимірювального інструментів виконуємо згідно рекомендацій [8-12]. Результати вибору занесені у таблицю 2.5.

Таблиця 2.5. Вибраний вимірювальний допоміжний інструменти

Перехід	Вимірювальний інструмент
Точити начорно по керуючій програмі поверхні витримуючи розміри 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	Штангенциркуль цифровий IP54 з роликом фірми МІКРОТЕХ з дискретністю 0,01 мм
Точити начисто по керуючій програмі циліндричні поверхні витримуючи розміри 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	Штангенциркуль цифровий IP54 з роликом фірми МІКРОТЕХ з дискретністю 0,01 мм
Фрезерувати шпонковий паз витримуючи розміри 1, 2, 6	Штангенциркуль ШЦ-I-250-0,05 ГОСТ 161-80
Фрезерувати шпонковий паз витримуючи розміри 3, 4, 5	Штангенциркуль ШЦ-I-250-0,05 ГОСТ 161-80

2.7. Вибір режимів різання для комплексної операції з ЧПК

Вибір режимів різання для комплексної операції з ЧПК, яка здійснюється на токарному патронно-центровому верстаті з ЧПК мод. SPU 40 CNC токарними інструментами фірми Kennametal здійснюємо згідно рекомендацій [13].

Результати вибору заносимо в таблицю 2.6.

Таблиця 2.6. Вибрані режими різання для точіння

Технологічний перехід	t, мм	S, мм/об	V, м/хв	n, об/хв
Точити начорно поверхню витримуючи розмір 1, 2	1,6	0,5	150	780
Точити начорно поверхню витримуючи розмір 3, 5	1,6	0,5	150	590
Точити начорно поверхню витримуючи розмір 4, 6	1,6	0,5	150	550
Точити начисто поверхню витримуючи розмір 1, 2	0,5	0,1	300	1570
Точити начисто поверхню витримуючи розмір 3, 5	0,5	0,1	300	1190
Точити начисто поверхню витримуючи розмір 4, 6	0,5	0,1	300	1120

Розрахунок режимів різання для обробки шпонкових пазів шириною 18 мм та 20 мм проведемо аналітичним методом.

1. Розрахунок режимів різання для засвердлювання шпонковою фрезою.

Швидкість різання визначається за формулою [11, 12]:

$$V_p = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot S^y} \cdot K_v, \quad (2.1)$$

де K_v - загальний поправочний коефіцієнт на швидкість різання, що враховує фактичні умови різання:

$$K_v = K_{Mv} * K_{Iv} * K_{lv}, \quad (2.2)$$

де K_{Mv} - коефіцієнт, що враховує якість оброблюваного матеріалу; $K_{Mv} = 1$

K_{Iv} - коефіцієнт, що враховує матеріал інструменту; $K_{Iv} = 1,2$

K_{lv} - коефіцієнт, що враховує глибину свердління; $K_{lv} = 1$.

За [11, 12] приймаємо наступні значення стійкості інструменту та значення коефіцієнтів, що входять до формули: $T=80$ хв; $C_v = 9,8$; $q=0,40$; $y=0,7$; $m=0,20$; $S_z=0,18$ мм/зуб

Для діаметра фрези 20 мм за формулою (2.1):

$$V_p = \frac{9,8 \cdot 20^{0,40}}{80^{0,2} \cdot 0,36^{0,7}} \cdot 1,2 = 23,4 \text{ м/хв.}$$

Частота обертання інструментального шпинделя револьверної головки:

$$n_p = \frac{1000 \cdot 23,4}{\pi \cdot 20} = 372,6 \text{ об/хв.}$$

2. Розрахунок режимів різання для фрезерування шпонковою фрезою

Розрахункову величину швидкості різання визначаємо за формулою (11.5):

Швидкість різання визначається за формулою [11, 12]:

$$V_p = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot Z^p} \cdot K_v, \quad (2.3)$$

де K_v - загальний поправочний коефіцієнт на швидкість різання, що враховує фактичні умови різання:

$$K_v = K_{Mv} \cdot K_{Nv} \cdot K_{Uv}, \quad (2.4)$$

де K_{Mv} - коефіцієнт, що враховує якість оброблюваного матеріалу; $K_{Mv} = 0,57$

K_{Nv} - коефіцієнт, що враховує стан поверхні заготовки; $K_{Nv} = 0,8$

K_{Uv} - коефіцієнт, що враховує матеріал інструменту; $K_{Uv} = 1$.

За [11, 12] приймаємо наступні значення стійкості інструменту та значення коефіцієнтів, що входять у формулу: $T=80$ мин; $C_v=46,7$; $q=0,45$; $x=0,5$; $y=0,5$; $u=p=0,1$; $m=0,33$; при $t=7,5$ мм і $B=20$ мм; $S_z=0,04$ мм/зуб.

Для діаметра фрези 20 мм за формулою (2.3):

$$V_p = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot Z^p} \cdot K_v = \frac{46,7 \cdot 20^{0,45}}{80^{0,33} \cdot 7,5^{0,5} \cdot 0,04^{0,5} \cdot 20^{0,1} \cdot 2^{0,1}} \cdot 0,57 \cdot 0,8 \cdot 1 = 23,7 \text{ м/хв.}$$

Частота обертання інструментального шпинделя револьверної головки:

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$n_p = \frac{1000 \cdot 23,7}{\pi \cdot 20} = 377 \text{ об/хв.}$$

Прийmemo частоту обертання інструментального шпинделя револьверної головки шпинделя $n=400$ об/хв

Хвилинну подачу поздовжнього супорта визначаємо за формулою:

$$S_i = S_z \cdot z \cdot n, \quad (2.5)$$

Підставивши значення у формулу (2.5) отримаємо:

$$S_i = 0,04 \cdot 2 \cdot 480 = 38.4 \text{ мм/хв.}$$

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		36

3. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1. Структура модернізованого приводу головного руху із кутовим позиціюванням шпинделя

Структура приводу головного руху включає асинхронний частотно-регульований електродвигун 1, який розміщений на кронштейні, двоступеневу планетарну коробку передач 2, вихідний вал якої з'єднаний із шпинделем 5 за допомогою поліклинового паса 3 (рис. 3.1). Привід головного руху модернізовано шляхом забезпечення кутового позиціювання та безперервної колової подачі від двигуна приводу головного руху з метою забезпечення комплексної обробки деталей (рис. 3.1). Це дозволяє здійснювати фрезерування і свердління на периметрі деталі, або обробку площин по осі шпинделя, або поза нею.

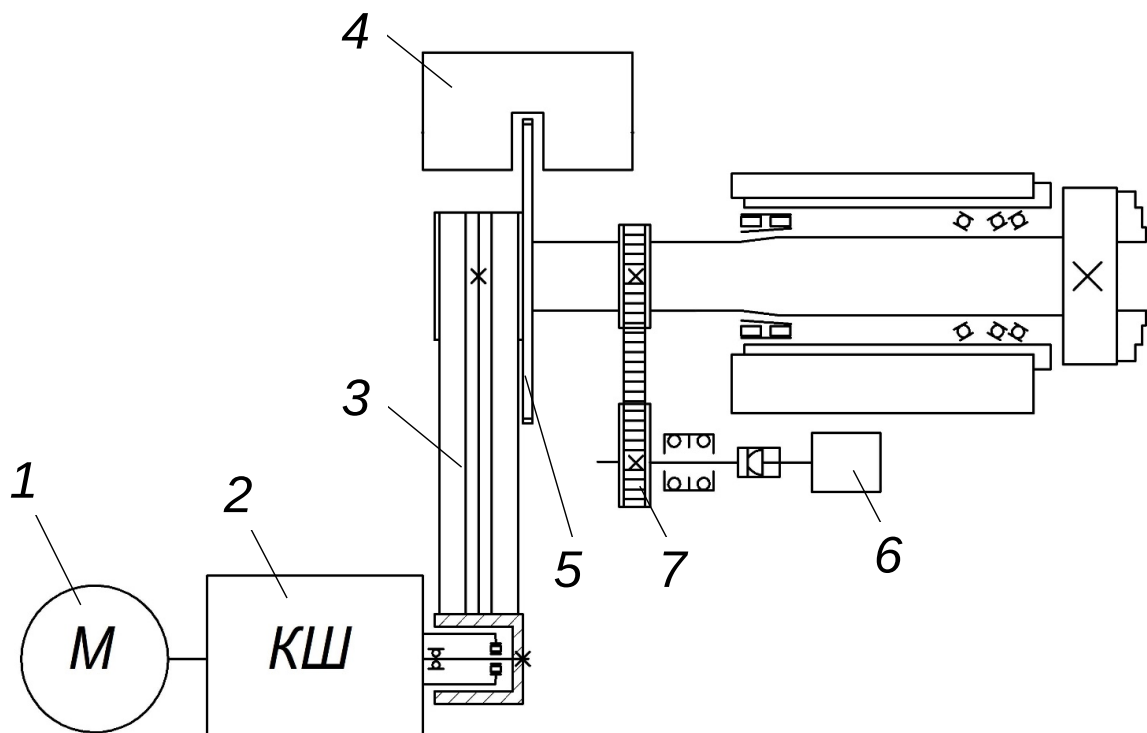


Рисунок 3.1 – Структура модернізованого приводу головного руху із кутовим позиціюванням шпинделя

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Конструкторський розділ				Літ.		Аркуш	Аркушів
Розробив	Демедюк В.Г.								Н		37	23
Перевірів	Волошин В.Н.											
Н. контр.	Кобельник В.Р.											
Затв.	Крупа В.В.								ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м. Тернопіль			

Для цього шпиндельний вузол оснащений гальмівним пристроєм, який складається із диска 5, закріпленого на приводному шківі пасової передачі 3. На корпусі шпиндельної бабки закріплені симетрично з двох боків гальмового диска 5 гідроциліндри гальма 4. Для контролю кутового положення шпинделя використовується датчик положення 6 обертового типу. Рух на нього передається від шпинделя зубчастою пасовою передачею 7.

3.2. Кінематичний розрахунок модернізованого приводу головного руху та вибір електродвигуна

Граничні частоти обертання шпинделя приймемо як у приводу головного руху токарного верстата з ЧПК SPU 40 CNC [2]:

- мінімальна частота обертання при точінні $n_{min}=20$ об/хв;
- максимальна частота обертання при точінні $n_{max}=3150$ об/хв.

Частоти обертання вала асинхронного електродвигуна з повітряним охолодженням приймемо як у приводу головного руху токарного верстата з ЧПК SPU 40 CNC [2]:

- номінальна частота обертання $n_{\partial ном}=1500$ об/хв;
- максимальна частота обертання $n_{\partial max}=6500$ об/хв.

Визначаємо діапазон регулювання приводу:

$$R = n_{max} / n_{min} = 3150 / 20 = 157 \quad (3.1)$$

Діапазон регулювання двигуна при постійній потужності:

$$R_{\partial} = n_{\partial max} / n_{\partial ном} = 6500 / 1500 = 4,3 \quad (3.2)$$

Виходячи із максимальних частот обертання шпинделя вале електродвигуна максимальне передавальне відношення приводу визначиться за формулою:

$$i_{max} = n_{max} / n_{\partial max}, \quad (3.3.)$$

Підставивши значення в формулу (3.8) отримаємо:

$$i_{max} = 3150 / 6500 = 0,45.$$

Для забезпечення безступеневого регулювання частоти обертання шпинделя при постійній потужності знаменник ряду передаточних відношень передач

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		38

коробки швидкостей φ приймаємо рівним R_d . Необхідне число ступеней коробки швидкостей (число піддіапазонів регулювання частоти обертання шпинделя):

$$Z = \lg R_d / \lg \varphi \quad (3.4.)$$

Підставивши значення в формулу (3.4) отримаємо:

$$Z = \lg 4,3 / \lg 2 = 2,1.$$

Приймаємо число ступеней коробки передач $Z=2$.

Тоді діапазон регулювання коробки швидкостей визначиться за залежністю:

$$R_M = \varphi^{z-1} \quad (3.5)$$

Підставивши значення в формулу (3.5) отримаємо:

$$R_M = 2^{2-1} = 2.$$

Приймаємо потужність і момент на шпинделі верстата таку саму як у токарного верстата з ЧПК SPU 40 CNC [2] – $N = 25$ кВт; $M_{\text{шп}} = 1000$ Нм.

На стадії попередніх розрахунків потрібна потужність двигуна може бути визначена за [3-5]:

$$N_d = \frac{N}{\eta}, \quad (3.6)$$

де η – коефіцієнт корисної дії приводу.

Для приводу головного руху, який включає поліклінопасову передачу та коробку швидкостей:

$$\eta = (\eta_1)^4 \cdot \eta_2 \cdot (\eta_3)^4 \cdot (\eta_4)^2, \quad (3.7)$$

$\eta_1 = 0,99$ - ККД тертя в підшипниках шпинделя;

$\eta_2 = 0,94$ - ККД поліклінопасової передачі;

$\eta_3 = 0,99$ - ККД тертя в парі підшипників коробки швидкостей;

$\eta_4 = 0,98$ - ККД зубчастої пари коробки швидкостей.

Підставивши значення у (3.6) та (3.7) отримаємо:

$$\eta = 0,99^4 \cdot 0,94 \cdot 0,99^4 \cdot 0,98^2 = 0,833;$$

$$N_d = 25 / 0,833 = 30 \text{ кВт}.$$

Вибираємо асинхронний частотно-регульований електродвигун з примусовим охолодженням мод. 1PH7 163 NF0 фірми SIEMENS з такими характеристиками [14]:

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- потужність двигуна $N_0=30$ кВт;
- максимальна частота обертання двигуна $n_{0.max}=6500$ об/хв;
- номінальна частота обертання двигуна $n_{0.ном.}=1500$ об/хв;
- номінальний крутний момент 235 Н·м.

3.3. Проектування шпиндельного вузла приводу головного руху

3.3.1. Вибір переднього кінця та компоновальної схеми шпиндельного вузла

Передній кінець шпинделя служить для базування і закріплення токарного затискного патрона. Передні кінці шпинделів токарних верстатів стандартизовані. Вибраний передній кінець шпинделя верстата зображено на рис. 3.2.

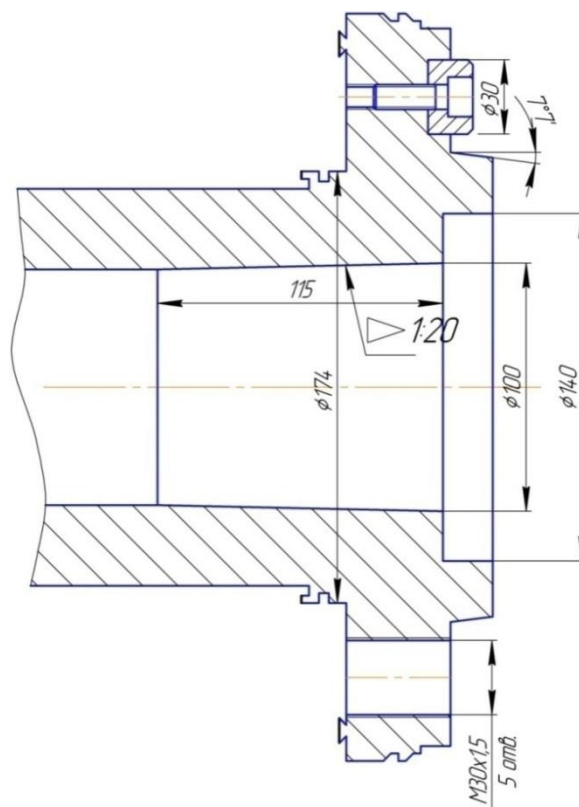


Рисунок 3.2 – Вибраний передній кінець шпинделя

Компоновальну схему шпиндельного вузла токарного верстата з ЧПК вибрано по максимальній частоті обертання (рис. 3.3).

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		40



Рисунок 3.3 –Компонувальна схема шпиндельного вузла

Згідно цієї схеми шпиндель монтують на трьох радіально-упорних підшипниках в передній опорі та роликовому циліндричному радіальному дворядному підшипнику в задній. Передня опора виконана по схемі «триплекс-тандем О-подібна».

3.3.2. Вибір опор шпиндельного вузла

Враховуючи розміри вибраного переднього кінця шпинделя приймемо діаметр шийки шпинделя під передню опору 160 мм. Для передньої опори виберемо кулькові радіально-упорні підшипники марки 7032. Вони використовуються при високих частотах обертання шпинделя. Під задню опору приймемо діаметр шийки шпинделя рівним 140 мм. По діаметру шийки шпинделя для задньої опори виберемо радіальний роликовий циліндричний дворядний підшипник марки NN3028. Такі підшипники призначені для шпиндельних вузлів які сприймають значні радіальні навантаження. Характеристики підшипників опор шпиндельного вузла приведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики підшипників опор шпинделя

№п/п	Характеристика підшипника	Позначення	Значення	
			7032	NN 3028
1.	Внутрішній діаметр	d, мм	160	140
2.	Зовнішній діаметр	D, мм	240	210
3.	Ширина підшипника	B, мм	38	53
4.	Динамічна вантажопідйомність	C _{dyn} , кН	126	305
5.	Статична вантажопідйомність	C ₀ , кН	140	235

6.	Максимальна частота обертання	n , хв. ⁻¹	5000	4900
7.	Сила натягу:			
	– легкий натяг	F_{VL} , Н	360	240
	– середній натяг	F_{VM} , Н	1080	720
8.	Кут контакту	α , град	12	15
9.	Вага підшипника	m , кг	6,03	6,15

Максимально допустима частота обертання шпинделя, встановленого на опорах кочення, згідно визначається за залежністю:

$$[n_{max}] = n_{nmax} f_r, \quad (3.8)$$

де n_{nmax} – максимальна частота обертання підшипника, хв.⁻¹;

f_r – фактор, який враховує компоновальну схему шпиндельного вузла.

При легкому натягу в підшипниках для вибраної компоновальної схеми шпиндельного вузла (рис. 3.3) $f_r = 0,65$.

За формулою (4.3) для передньої опори отримаємо:

$$[n_{max}] = 5000 \cdot 0,65 = 3250 \text{ хв}^{-1} > n_{max} = 3150 \text{ хв}^{-1}.$$

Отже, по допустимій частоті обертання шпинделя підшипники вибрані правильно.

3.3.3. Розрахунок осової жорсткості шпиндельного вузла з використанням пакета прикладних програм MathCAD

За розробленою конструктивною схемою передньої опори шпиндельного вузла (рис. 3.4.) будуємо повну розрахункову схему з врахуванням всіх елементів, які сприймають осове навантаження (рис.3.5).

З врахуванням напрямів дії осового зусилля на елементи конструкції передньої опори шпиндельного будуємо приведену розрахункову схему, яка приведена на рис. 3.6.

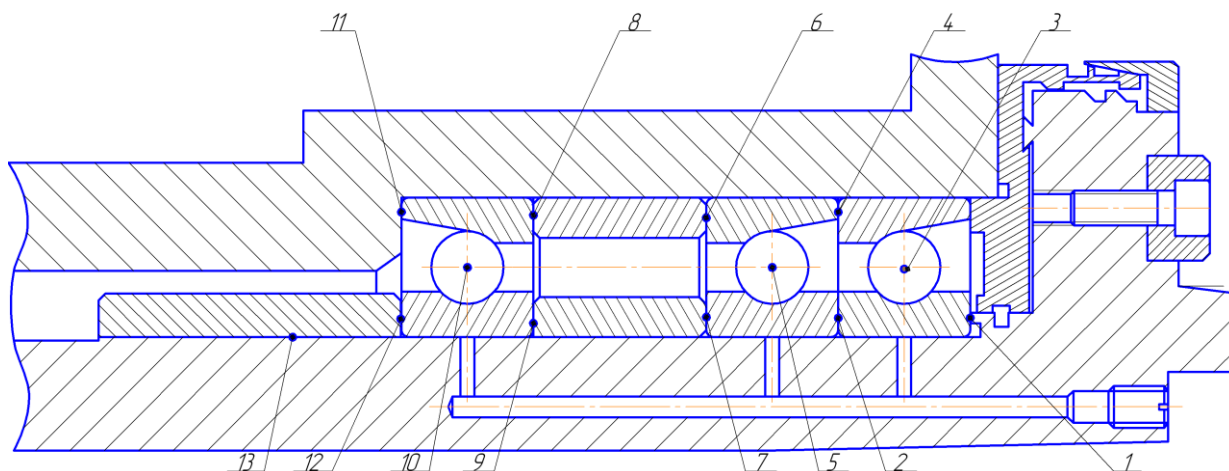


Рисунок 3.4 – Конструктивна схема передньої опори шпиндельного вузла

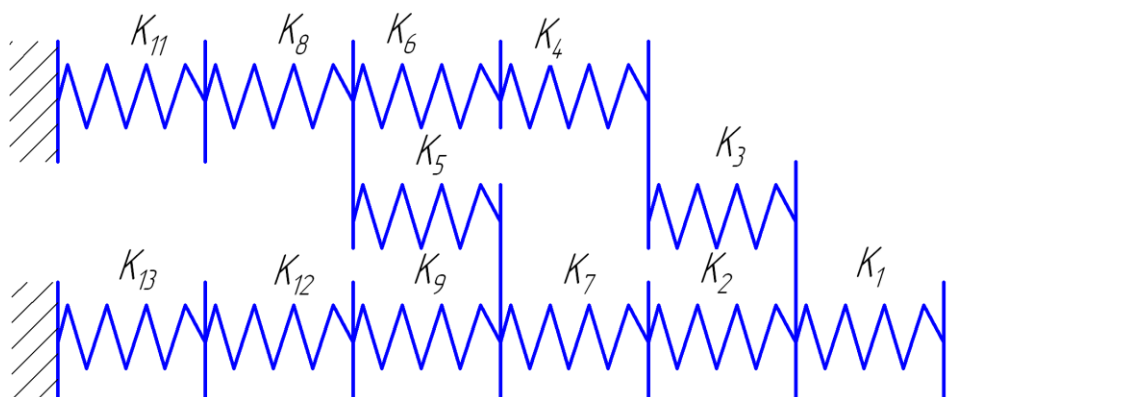


Рисунок 3.5 – Повна розрахункова схема для визначення осьової жорсткості

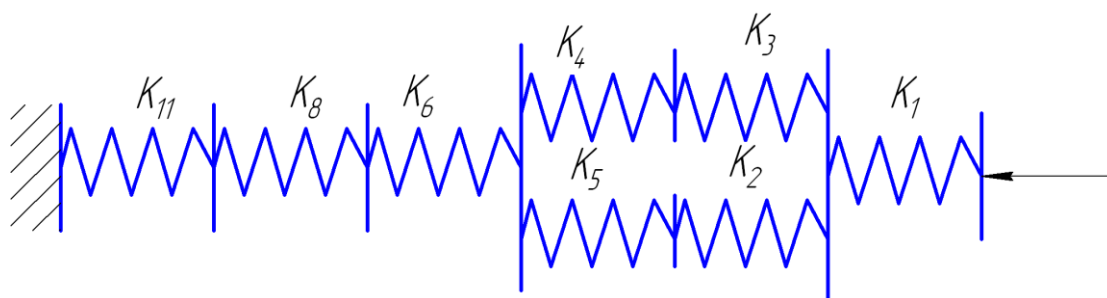


Рисунок 3.6 – Приведена розрахункова схема для визначення осьової жорсткості

Величина жорсткості підшипника є оберненою величиною до його податливості. Враховуючи що осьова податливість підшипника рівна $C=2,87 \cdot 10^{-7}$ мм/Н отримуємо:

$$\hat{E}_3 := \frac{1}{2,87 \cdot 10^{-6}} = 3,484 \times 10^5 \quad \frac{\text{Н}}{\text{мм}}.$$

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ

Арк.

43

$$K_5 := \hat{E}_3 = 3.484 \times 10^5 \frac{\text{H}}{\text{mm}}; \quad K_{10} := \hat{E}_3 = 3.484 \times 10^5 \frac{\text{H}}{\text{mm}}.$$

Визначаємо величини контактної жорсткості ділянок контакту:

$$K_{\sigma} := 1.5 \cdot 10^{-2} \frac{\text{mm}^3}{\text{H}}; \quad d_{11} := 186 \text{mm}; \quad d_{12} := 160 \text{mm};$$

$$d_{41} := 240 \text{mm} \quad d_{42} := 216 \text{mm}.$$

$$S_1 := \frac{\pi \cdot d_{11}^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{12}^2}{4} = 7.065 \times 10^3 \text{ mm}^2;$$

$$S_4 := \frac{\pi \cdot d_{41}^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{42}^2}{4} = 8.595 \times 10^3 \text{ mm}^2;$$

$$\hat{E}_1 := \frac{S_1}{K_{\sigma}} = 4.71 \times 10^5 \frac{\text{H}}{\text{mm}};$$

$$\hat{E}_4 := \frac{S_4}{K_{\sigma}} = 5.73 \times 10^5 \frac{\text{H}}{\text{mm}}.$$

З рис.4.6. видно, що:

$$K_2 := \hat{E}_1 = 4.71 \times 10^5 \frac{\text{H}}{\text{mm}} \quad K_7 := \hat{E}_1 = 4.71 \times 10^5 \frac{\text{H}}{\text{mm}}$$

$$K_9 := \hat{E}_1 = 4.71 \times 10^5 \frac{\text{H}}{\text{mm}};$$

$$K_6 := \hat{E}_4 = 5.73 \times 10^5 \frac{\text{H}}{\text{mm}}; \quad K_8 := \hat{E}_4 = 5.73 \times 10^5 \frac{\text{H}}{\text{mm}};$$

$$K_{11} := \hat{E}_4 = 5.73 \times 10^5 \frac{\text{H}}{\text{mm}}.$$

Спростимо розрахункову схему, приведену на рис. 3.6 шляхом об'єднання послідовно з'єднаних пружних елементів. Спрощена розрахункова схема приведена на рис. 3.7.

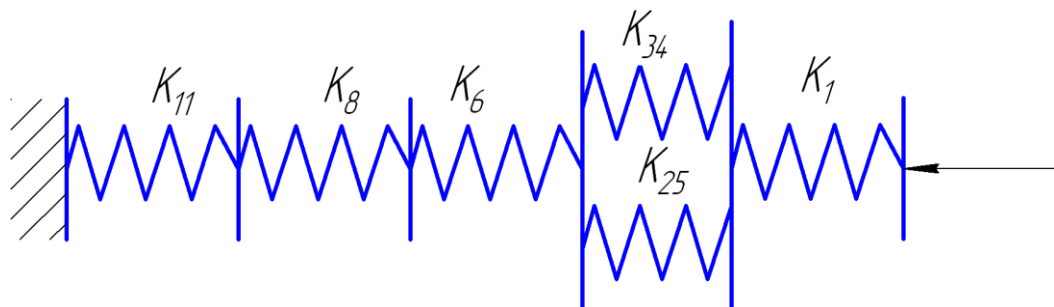


Рисунок 3.7 – Спрощена розрахункова схема для визначення осьової жорсткості

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		44

З врахуванням методів спрощення розрахункових схем визначаємо осьову жорсткість зведених елементів:

$$\hat{E}_{34} := \frac{1}{\hat{E}_3} + \frac{1}{\hat{E}_4} = 4.615 \times 10^{-6} \frac{\text{Н}}{\text{мм}};$$

$$\hat{E}_{25} := \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_5} = 4.993 \times 10^{-6} \frac{\text{Н}}{\text{мм}};$$

Спростимо розрахункову схему, приведену на рис. 3.7 шляхом об'єднання паралельно з'єднаних пружних елементів. Спрощена розрахункова схема приведена на рис. 3.8.

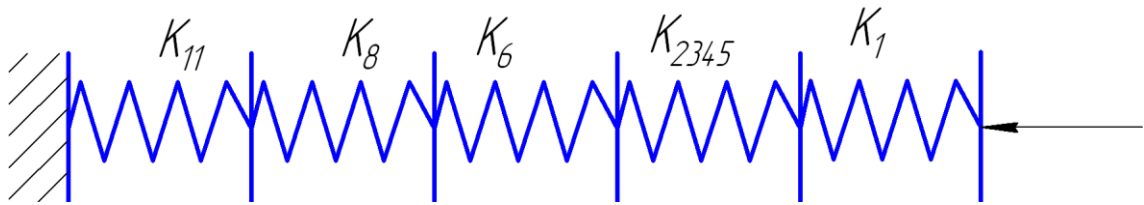


Рисунок 3.8 – Спрощена розрахункова схема для визначення осьової жорсткості

З врахуванням методів спрощення розрахункових схем визначаємо осьову жорсткість зведених елементів:

$$\hat{E}_{2345} := \hat{E}_{34} + \hat{E}_{25} = 9.609 \times 10^{-6} \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

Осьова жорсткість шпиндельного вузла

$$K_{i\partial} := \frac{1}{\hat{E}_1} + \frac{1}{K_6} + \frac{1}{K_8} + \frac{1}{\hat{E}_{2345}} + \frac{1}{K_{11}} = 1.041 \times 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{мм}} := 104.1 \cdot \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

3.3.4. Розрахунок радіальної жорсткості шпиндельного вузла, як статично невизначеної системи, з використанням пакету прикладних програм MathCAD

На основі конструктивної схеми шпиндельного вузла складаємо принципову, повну та приведену розрахункову схеми шпиндельного вузла для радіальної жорсткості (рис. 3.9).

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		45

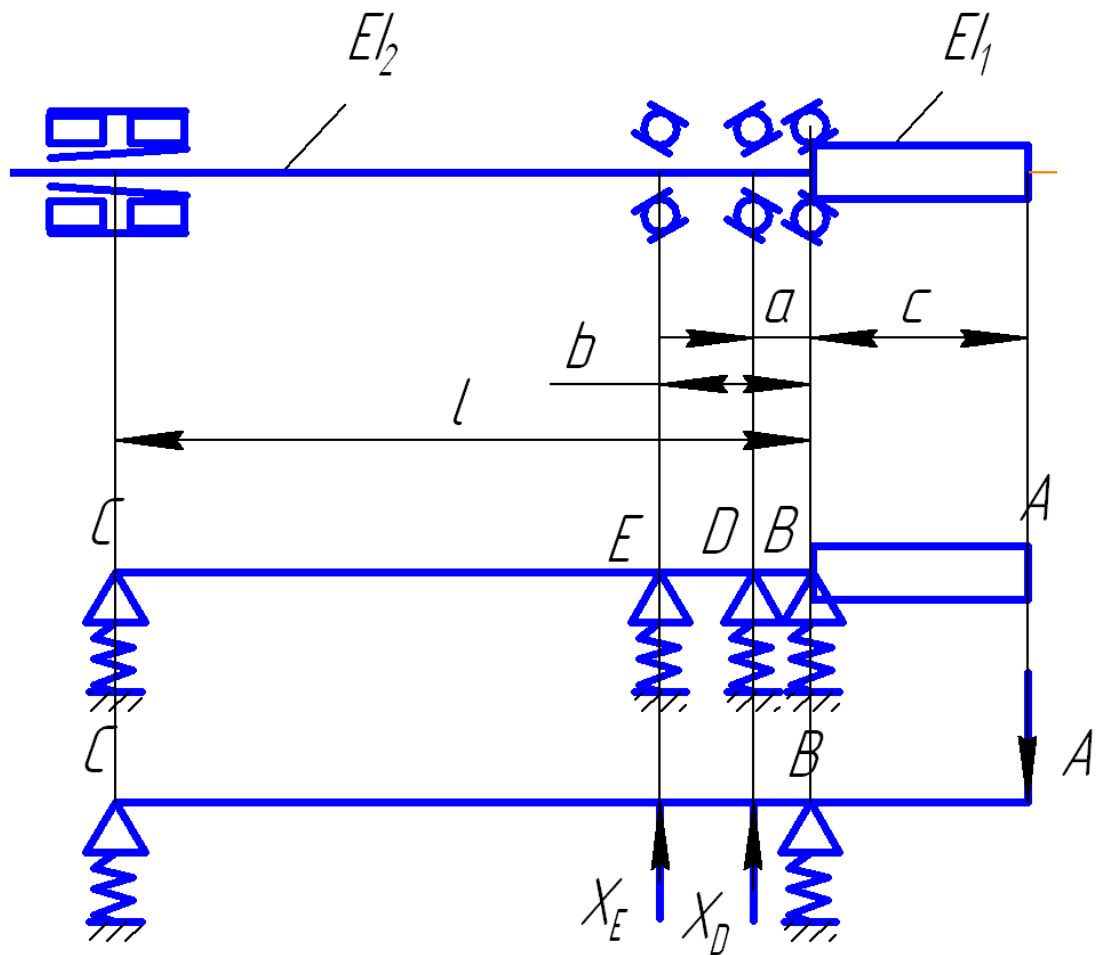


Рисунок 3.9 – Компонувальна, повна та приведена розрахункові схеми шпиндельного вузла

Визначаємо моменти інерції кожної ділянки шпинделя і зведені моменти інерції:

$$a := 38 \text{ mm}; b := 126 \text{ mm}; c := 96 \text{ mm}; l := 457 \text{ mm};$$

$$d_{11} := 189 \text{ mm}; d_{12} := 140 \text{ mm}; d_{21} := 301 \text{ mm}; d_{22} := 100 \text{ mm};$$

$$d_{31} := 174 \text{ mm}; d_{32} := 95 \text{ mm}; l_1 := 17 \text{ mm}; l_2 := 42 \text{ mm}; l_3 := 15 \text{ mm};$$

$$I_{11} := \frac{\pi \cdot (d_{11} - d_{12})^4}{64} = 2.83 \times 10^5 \text{ mm}^4;$$

$$I_{12} := \frac{\pi \cdot (d_{21} - d_{22})^4}{64} = 8.012 \times 10^7 \text{ mm}^4;$$

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ

Арк.

46

$$I_{13} := \frac{\pi \cdot (d_{31} - d_{32})^4}{64} = 1.912 \times 10^6 \quad \text{mm}^4;$$

$$I_1 := \frac{I_{11} \cdot l_1 + I_{12} \cdot l_2 + I_{13} \cdot l_3}{l_1 + l_2 + l_3} = 4.593 \times 10^7 \quad \text{mm}^4;$$

$$d_{41} := 160 \text{ mm}; \quad d_{42} := 95 \text{ mm}; \quad d_{51} := 158 \text{ mm}; \quad d_{52} := 95 \text{ mm}; \quad d_{61} := 144 \text{ mm};$$

$$d_{62} := 95 \text{ mm}; \quad d_{71} := 140 \text{ mm}; \quad d_{72} := 95 \text{ mm}; \quad l_4 := 254 \text{ mm}; \quad l_5 := 173 \text{ mm};$$

$$l_6 := 25 \text{ mm}; \quad l_7 := 288 \text{ mm};$$

$$I_{21} := \frac{\pi \cdot (d_{41} - d_{42})^4}{64} = 8.762 \times 10^5 \quad \text{mm}^4;$$

$$I_{22} := \frac{\pi \cdot (d_{51} - d_{52})^4}{64} = 7.733 \times 10^5 \quad \text{mm}^4;$$

$$I_{23} := \frac{\pi \cdot (d_{61} - d_{62})^4}{64} = 2.83 \times 10^5 \quad \text{mm}^4;$$

$$I_{24} := \frac{\pi \cdot (d_{71} - d_{72})^4}{64} = 2.013 \times 10^5 \quad \text{mm}^4;$$

$$I_2 := \frac{I_{21} \cdot l_4 + I_{22} \cdot l_5 + I_{23} \cdot l_6 + I_{24} \cdot l_7}{l_4 + l_5 + l_6 + l_7} = 5.694 \times 10^5 \quad \text{mm}^4;$$

Жорсткості опор вибираємо з довідникових даних, приведених у [15].
Значення модуля пружності другого роду також вибираємо з [15].

$$E := 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}; \quad C_D := 2.87 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{H}}; \quad C_E := 2.87 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{H}};$$

$$C_c := 1.563 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{H}}; \quad C_b := 2.87 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{H}};$$

Для визначення радіальної жорсткості переднього кінця шпинделя потрібно визначити наступні коефіцієнти впливу податливості:

$$\alpha_{\Delta\Delta} := \alpha_{\Delta\Delta 1} + \alpha_{\Delta\Delta 2}$$

$$\alpha_{\Delta D} := \alpha_{\Delta D 1} + \alpha_{\Delta D 2}$$

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\alpha_{DD} := \alpha_{DD1} + \alpha_{DD2}$$

$$\delta_{AAD} := \alpha_{\Delta\Delta} - \frac{\alpha_{\Delta D}^2}{\alpha_{DD} + C_D}$$

$$\alpha_{\Delta E} := \alpha_{AE1} + \alpha_{AE2}$$

$$\alpha_{EE} := \alpha_{EE1} + \alpha_{EE2}$$

$$\delta_{AAE} := \delta_{AAD} - \frac{\alpha_{\Delta E}^2}{\alpha_{EE} + C_E}$$

Визначаємо коефіцієнт впливу податливості α_{AA} .

Розрахункова схема для визначення даного коефіцієнта впливу податливості приведена на рис. 3.10.

Розрахунок першої складової коефіцієнта впливу податливості будемо проводити за правилом Верещагіна [16]. Для цього знаходимо необхідні для розрахунку площі фігур і координати центра ваги:

$$\dot{I}_1 := \frac{1}{2} \cdot c \cdot c \cdot 1 = 4.608 \times 10^3 \text{ mm}^2; \quad \dot{I}_2 := \frac{1}{2} \cdot l \cdot c \cdot 1 = 2.194 \times 10^4 \text{ mm}^2;$$

$$\omega_1 := \frac{2}{3} \cdot c \cdot 1 = 64 \text{ mm}; \quad \omega_2 := \frac{2}{3} \cdot c \cdot 1 = 64 \text{ mm};$$

Перша складова коефіцієнта впливу податливості за правилом Верещагіна:

$$\alpha_{\Delta\Delta 1} := \frac{1}{E \cdot I_1} \cdot \dot{I}_1 \cdot \omega_1 + \frac{1}{E \cdot I_2} \cdot \dot{I}_2 \cdot \omega_2 = 1.236 \times 10^{-5} \frac{\text{mm}}{\text{H}};$$

Друга складова коефіцієнта впливу податливості [16]:

$$\alpha_{\Delta\Delta 2} := \frac{(1+c) \cdot (1+c)}{l^2} \cdot C_c + \frac{c^2}{l^2} \cdot C_b = 2.415 \times 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{H}};$$

В результаті отримуємо:

$$\alpha_{\Delta\Delta} := \alpha_{\Delta\Delta 1} + \alpha_{\Delta\Delta 2} = 1.477 \times 10^{-5} \frac{\text{mm}}{\text{H}}.$$

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		48

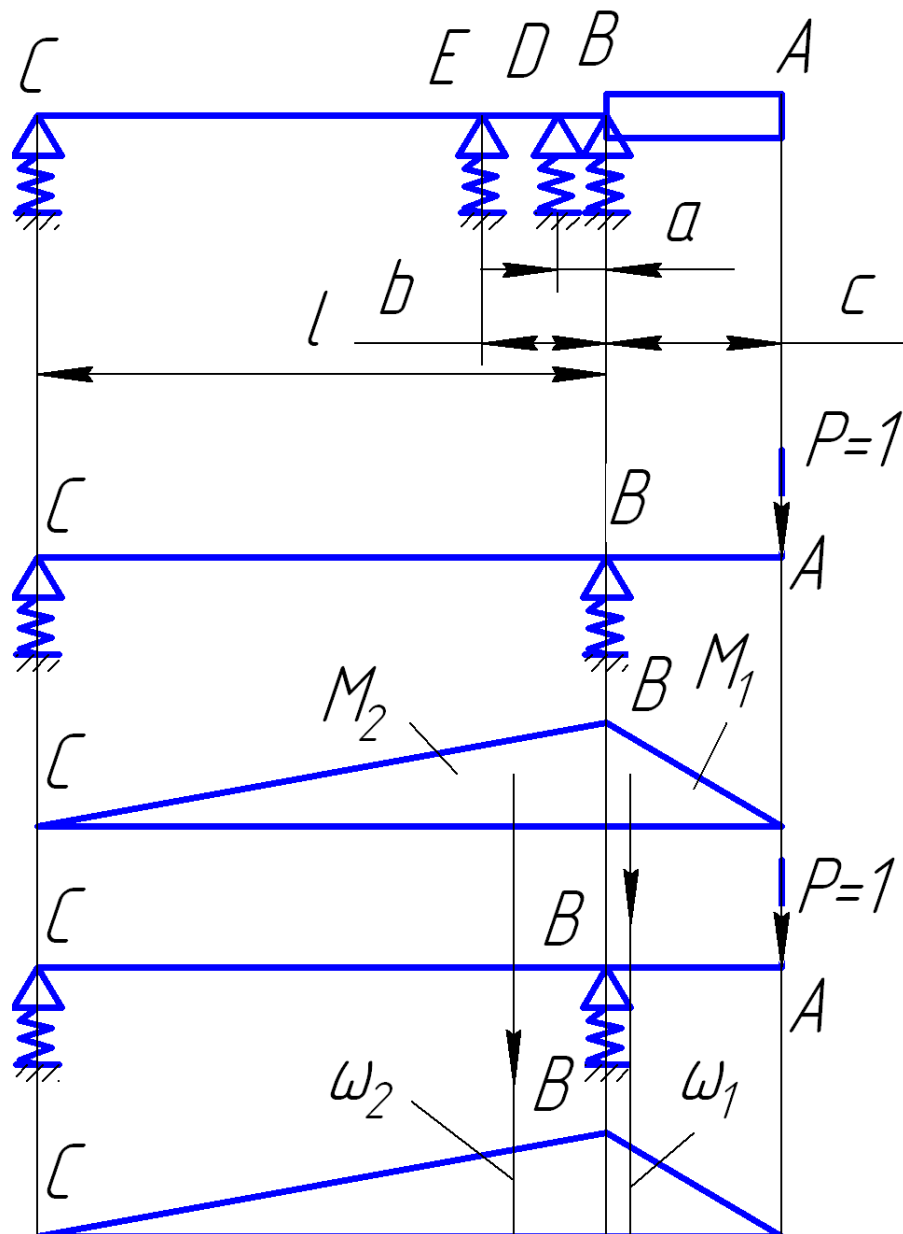


Рисунок 3.10 – Розрахункова схема для визначення коефіцієнта впливу податливості α_{AA}

Визначаємо коефіцієнт впливу податливості α_{AD} .

Розрахункова схема для визначення даного коефіцієнта впливу податливості приведена на рис. 3.11.

Розрахунок першої складової коефіцієнта впливу податливості будемо проводити за правилом Верещагіна [16]. Для цього знаходимо необхідні для розрахунку реакції опор, площі фігур і координати центра ваги:

$$R_c := \frac{a}{l} = 0.083 ; \quad R_b := \frac{l-a}{l} = 0.917 ;$$

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ

Арк.

49

$$R_c := \frac{a}{l} = 0.083 ; \quad R_b := \frac{l-a}{l} = 0.917 ;$$

$$\dot{I}_{1.1} := \frac{1}{2} \cdot R_b \cdot a \cdot a = 661.965 \quad \text{mm}^2; \quad \dot{I}_{1.2} := \frac{1}{2} \cdot [(l-a) R_b \cdot a] = 7.299 \times 10^3 \quad \text{mm}^2;$$

$$\omega_{1.1} := \frac{2}{3} \cdot R_c \cdot (l-a) = 23.227 \quad \text{mm};$$

$$\omega_{1.2} := \frac{\left[\left(l-a + \frac{1}{3} \cdot a \right) c \right]}{1} = 90.678 \quad \text{mm};$$

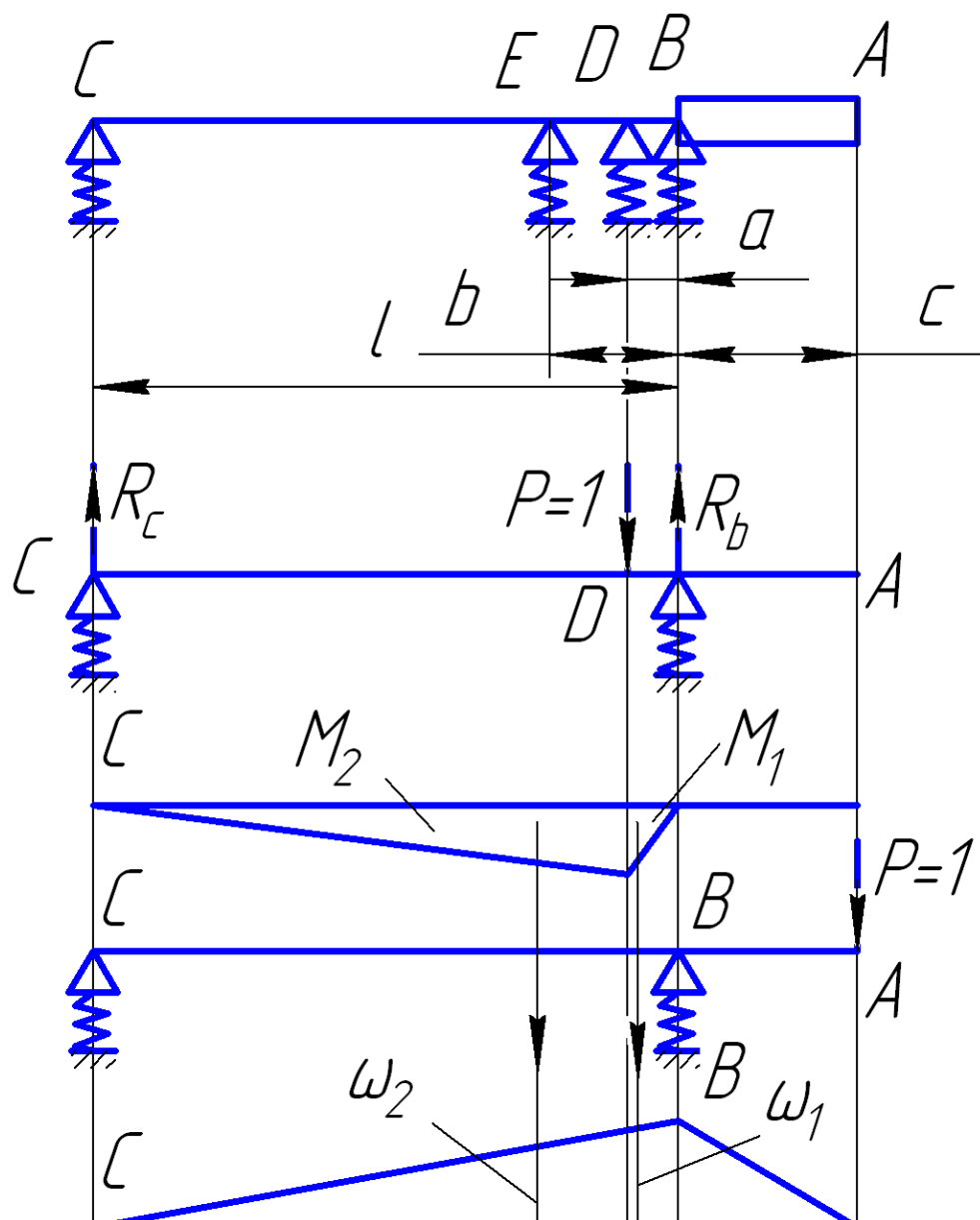


Рисунок 3.11 – Розрахункова схема для визначення коефіцієнта впливу
податливості α_{AD}

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ

Арк.

50

Перша складова коефіцієнта впливу податливості за правилом Верещагіна:

$$\alpha_{AD1} := \frac{1}{E \cdot I_2} \cdot [-\dot{I}_1 \cdot \omega_1 + (-\dot{I}_2 \cdot \omega_2)] = -5.947 \times 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{H}};$$

Друга складова коефіцієнта впливу податливості [16]:

$$\alpha_{AD2} := \frac{(1+c) \cdot (1+a)}{l^2} \cdot C_c + \frac{c \cdot a}{l^2} \cdot C_b = 2.099 \times 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{H}};$$

В результаті отримуємо:

$$\alpha_{AD} := \alpha_{AD1} + \alpha_{AD2} = -3.848 \times 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{H}}.$$

Визначаємо коефіцієнт впливу податливості α_{DD}

Розрахункова схема для визначення даного коефіцієнта впливу податливості приведена на рис. 3.12.

Розрахунок першої складової коефіцієнта впливу податливості будемо проводити за правилом Верещагіна [16]. Для цього знаходимо необхідні для розрахунку реакції опор, площі фігур і координати центра ваги:

$$R_a := \frac{a}{l} = 0.083 ; \quad R_b := \frac{l-a}{l} = 0.917 ;$$

$$\dot{I}_{1.1} := \frac{1}{2} \cdot R_b \cdot a \cdot a = 661.965 \text{ mm}^2; \quad \dot{I}_{1.2} := \frac{1}{2} \cdot [(1-a)R_b \cdot a] = 7.299 \times 10^3 \text{ mm}^2;$$

$$\omega_{1.1} := \frac{2}{3} \cdot R_b \cdot a = 23.227 \text{ mm}; \quad \omega_{1.2} := \frac{2}{3} \cdot R_b \cdot a = 23.227 \text{ mm};$$

Перша складова коефіцієнта впливу податливості за правилом Верещагіна:

$$\alpha_{DD1} := \frac{1}{E \cdot I_2} \cdot (\dot{I}_1 \cdot \omega_1 + \dot{I}_2 \cdot \omega_2) = 1.624 \times 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{H}};$$

Друга складова коефіцієнта впливу податливості [16]:

$$\alpha_{DD2} := \frac{(1+a) \cdot (1+a)}{l^2} \cdot C_c + \frac{a \cdot a}{l^2} \cdot C_b = 1.854 \times 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{H}};$$

В результаті отримуємо:

$$\alpha_{DD} := \alpha_{DD1} + \alpha_{DD2} = 3.477 \times 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{H}}.$$

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		51

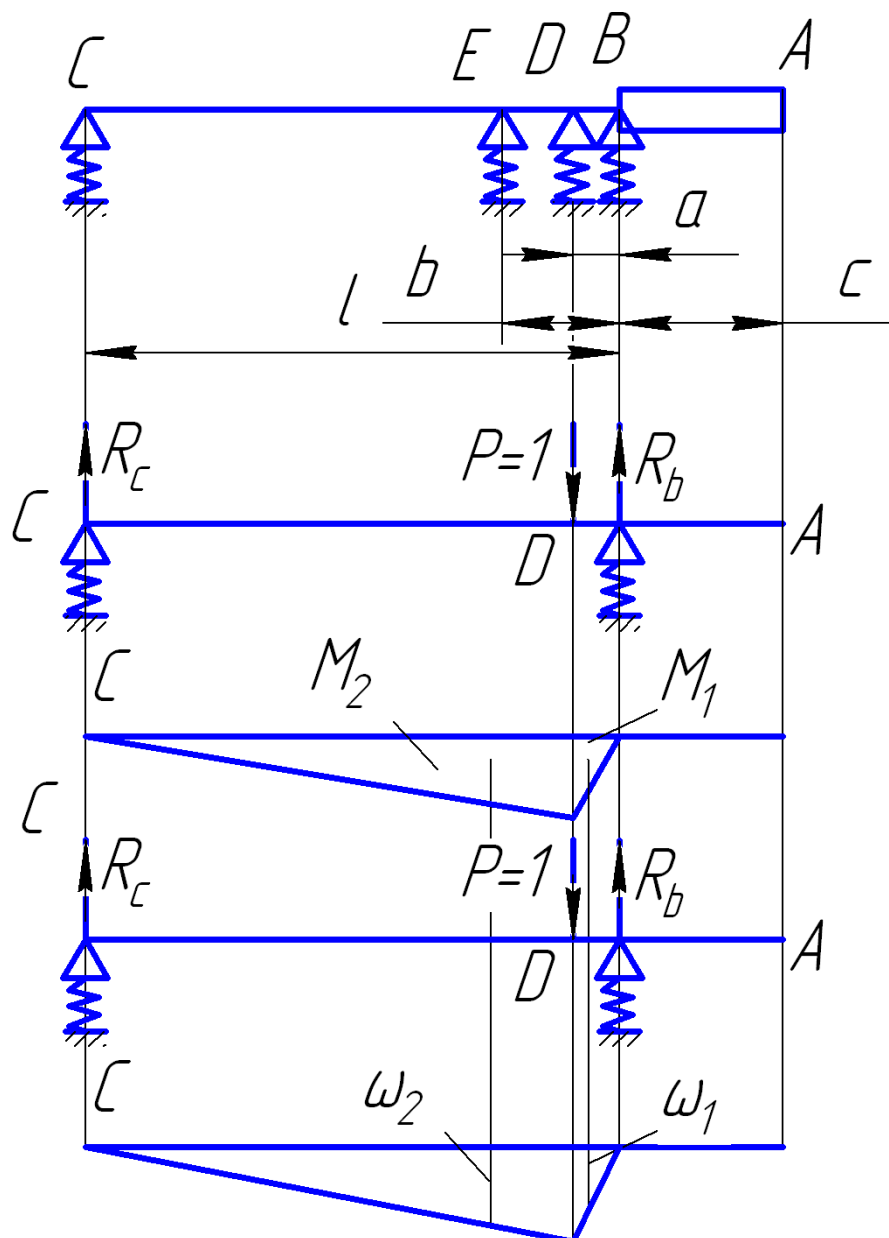


Рисунок 3.12 – Розрахункова схема для визначення коефіцієнта впливу податливості α_{DD}

Визначаємо коефіцієнт впливу податливості α_{AE}

Розрахункова схема для визначення даного коефіцієнта впливу податливості приведена на рис. 3.13.

Розрахунок першої складової коефіцієнта впливу податливості будемо проводити за правилом Верещагіна [16]. Для цього знаходимо необхідні для розрахунку реакції опор, площі фігур і координати центра ваги:

$$R_C := \frac{b}{l} = 0.276 \quad R_B := \frac{l-b}{l} = 0.724$$

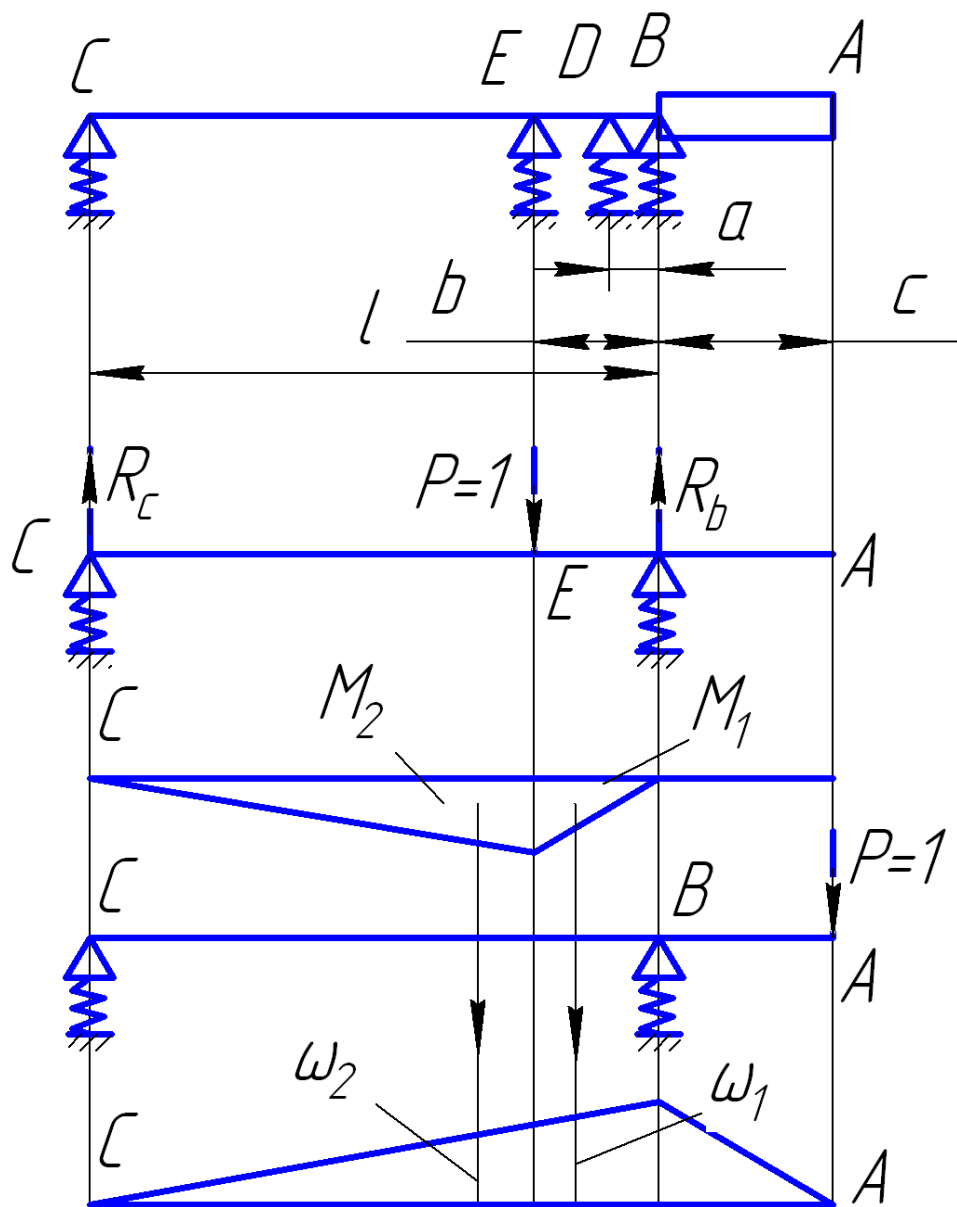


Рисунок 3.13 – Розрахункова схема для визначення коефіцієнта впливу
податливості α_{AE}

$$\dot{I}_{1.1} := \frac{1}{2} \cdot R_b \cdot b \cdot b = 5.749 \times 10^3 \text{ mm}^2; \quad \dot{I}_{1.2} := \frac{1}{2} \cdot [(1-b)R_b \cdot b] = 1.51 \times 10^4 \text{ mm}^2;$$

$$\omega_{1.1} := \frac{2}{3} \cdot R_c \cdot (1-b) = 60.84 \text{ mm}$$

$$\omega_{1.2} := \frac{\left[\left(1-b + \frac{1}{3} \cdot b \right) c \right]}{1} = 78.354 \text{ mm};$$

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ

Арк.

53

Перша складова коефіцієнта впливу податливості за правилом Верещагіна:

$$\alpha_{AE1} := \frac{1}{E \cdot I_2} \cdot \left[-\dot{I}_1 \cdot \omega_1 + (-\dot{I}_2 \cdot \omega_2) \right] = -1.346 \times 10^{-5} \frac{\text{mm}}{\text{H}};$$

Друга складова коефіцієнта впливу податливості [16]:

$$\alpha_{AE2} := \frac{(1+c) \cdot (1+b)}{l^2} \cdot C_c + \frac{c \cdot b}{l^2} \cdot C_b = 2.579 \times 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{H}};$$

В результаті отримуємо:

$$\alpha_{AE} := \alpha_{AE1} + \alpha_{AE2} = -1.088 \times 10^{-5} \frac{\text{mm}}{\text{H}}.$$

Визначаємо коефіцієнт впливу податливості α_{EE}

Розрахункова схема для визначення даного коефіцієнта впливу податливості приведена на рис. 3.14.

Розрахунок першої складової коефіцієнта впливу податливості будемо проводити за правилом Верещагіна [16]. Для цього знаходимо необхідні для розрахунку реакції опор, площі фігур і координати центра ваги:

$$R_c := \frac{b}{l} = 0.276 ; \quad R_b := \frac{l-b}{l} = 0.724 ; \quad \omega_2 := \frac{2}{3} \cdot R_b \cdot b = 60.84$$

$$\dot{I}_{11} := \frac{1}{2} \cdot R_b \cdot b \cdot b = 5.749 \times 10^3 \text{ mm}^2 \quad \dot{I}_{12} := \frac{1}{2} \cdot [(1-b)R_b \cdot b] = 1.51 \times 10^4 \text{ mm}^2;$$

$$\omega_1 := \frac{2}{3} \cdot R_b \cdot b = 60.84 \text{ mm};$$

Перша складова коефіцієнта впливу податливості за правилом Верещагіна:

$$\alpha_{EE1} := \frac{1}{E \cdot I_2} \cdot (\dot{I}_1 \cdot \omega_1 + \dot{I}_2 \cdot \omega_2) = 1.114 \times 10^{-5} \frac{\text{mm}}{\text{H}}$$

Друга складова коефіцієнта впливу податливості [16]:

$$\alpha_{EE2} := \frac{(1+b) \cdot (1+b)}{l^2} \cdot C_c + \frac{b \cdot b}{l^2} \cdot C_b = 2.762 \times 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{H}}$$

В результаті отримуємо:

$$\alpha_{EE} := \alpha_{EE1} + \alpha_{EE2} = 1.39 \times 10^{-5} \frac{\text{mm}}{\text{H}}.$$

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		54

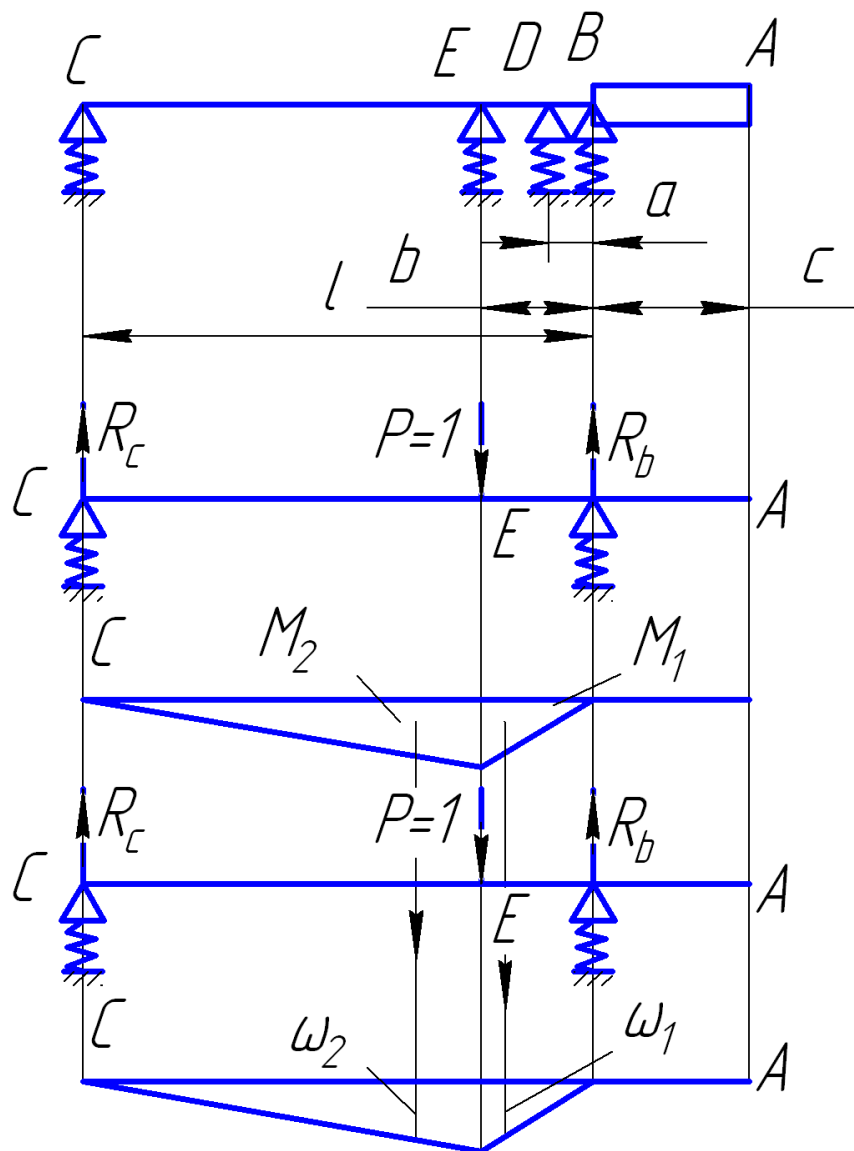


Рисунок 3.14 – Розрахункова схема для визначення коефіцієнта впливу податливості α_{EE}

Коефіцієнти впливу податливості статично невизначеної системи:

$$\delta_{AAD} := \alpha_{AD} - \frac{\alpha_{AD}^2}{\alpha_{DD} + C_D} = 1.244 \times 10^{-5} \frac{\text{mm}}{\text{H}};$$

$$\delta_{AAE} := \delta_{AAD} - \frac{\alpha_{AE}^2}{\alpha_{EE} + C_E} = 5.379 \times 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{H}};$$

Радіальна жорсткість переднього кінця шпиндельного вузла

$$j := \frac{1}{\delta_{AAE}} = 1.859 \times 10^5 \frac{\text{H}}{\text{mm}} := 185.9 \cdot \frac{\text{H}}{\text{mm}}.$$

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ

Арк.

55

3.4. Розроблення конструкції механізму кутового позиціювання шпинделя

Двигун приводу головного руху забезпечує кутове позиціювання та безперервну колову подачу. Для фіксації шпиндельного вузла в певному кутовому положенні служить гальмівний пристрій. Він також забезпечує підгальмовування шпинделя в режимі безперервної колової подачі.

Гальмівний пристрій шпинделя виконаний у вигляді дискового гальма (рис.3.15). Корпус дискового гальма 11 розміщений біля заднього кінця шпинделя, на якому знаходиться гальмівний диск. Консоль 19 прикріплена болтами 20, 16 до корпусу шпиндельної бабки. З консоллю 19 дискове гальмо з'єднане болтами 17. Для забезпечення однакової відстань X між сталевим гальмівним диском та пластинами 2 і 5 з гальмівними накладками служить проміжна пластина 15, яка підганяється при монтажі. Гальмівні колодки встановлюються у корпусі гальма за допомогою болтів 3.

Гальмування шпинделя забезпечується пружинами 13 Розгальмовування гальмівного диску – гідравлічне. Якщо в гідравлічному ланцюзі гальма немає тиску масла, то шпиндель верстата завжди загальмований. Для послаблення тиску на гальмівний диск при демонтажі корпусу гальма гальмівні колодки можуть бути віджаті за допомогою болтів 29 та 30 через отвори 27 та 28.

Для контролю швидкості обертання шпинделя служить вимірювальний пристрій, який розміщений на шпиндельній бабці. Вимірювальний пристрій встановлений на консолі 1, прикріпленій болтами 17 до корпусу шпиндельної бабки. В консолі 1 змонтований вал 6 на кулькових радіальних підшипниках 8. На одному кінці валу 6 встановлений шків 2 зубчатої пасової передачі. Датчик контролю положення шпинделя з'єднується з валом 6 за допомогою беззazorної пружної муфти 15.

Обертання на датчик контролю положення шпинделя здійснюється від шківів зубчатої пасової передачі, розміщеного на шпинделі, через зубчатий пас.

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		56

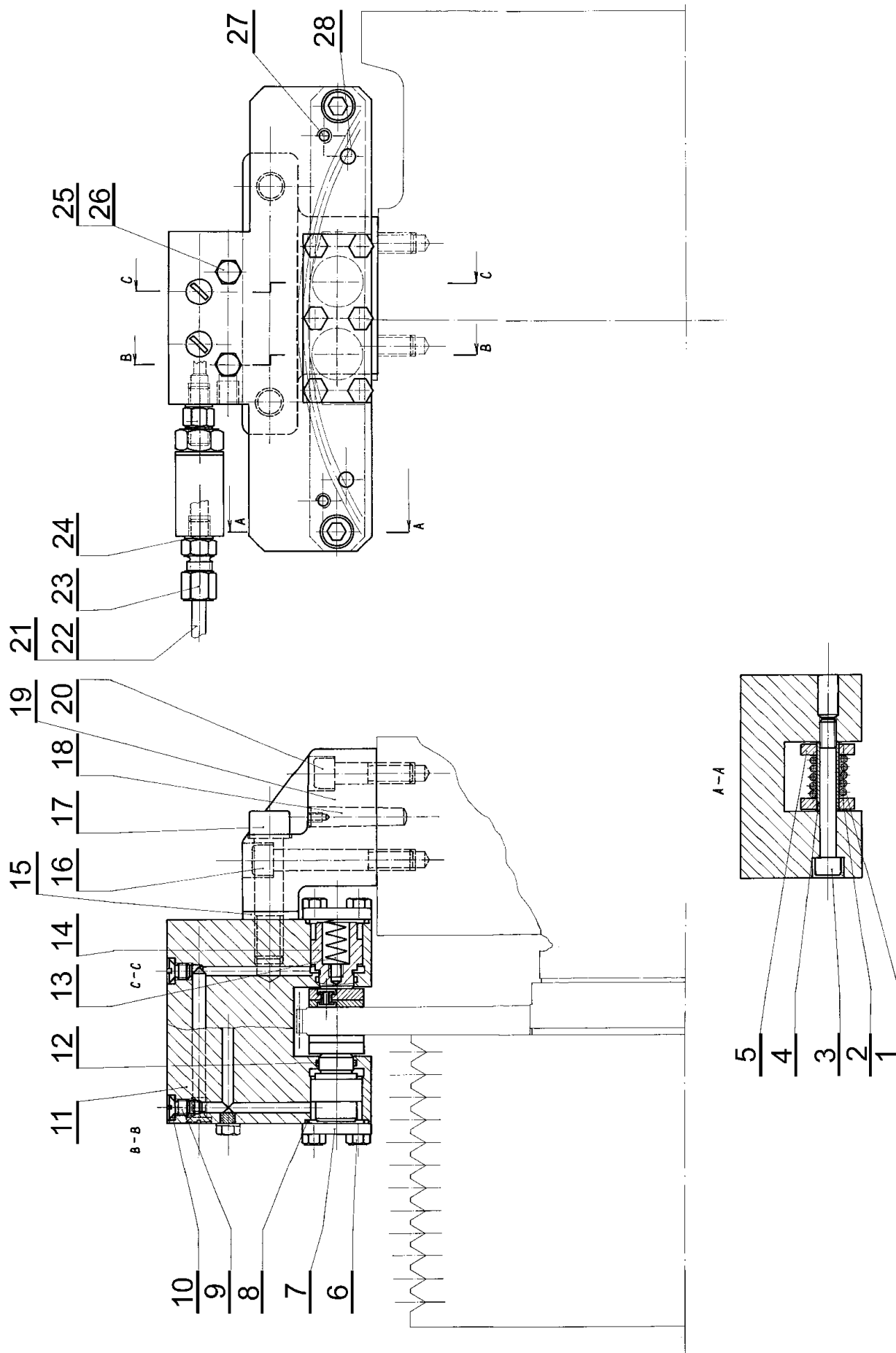


Рисунок 3.15 – Гальмівний пристрій шпинделя

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ

Арк.

57

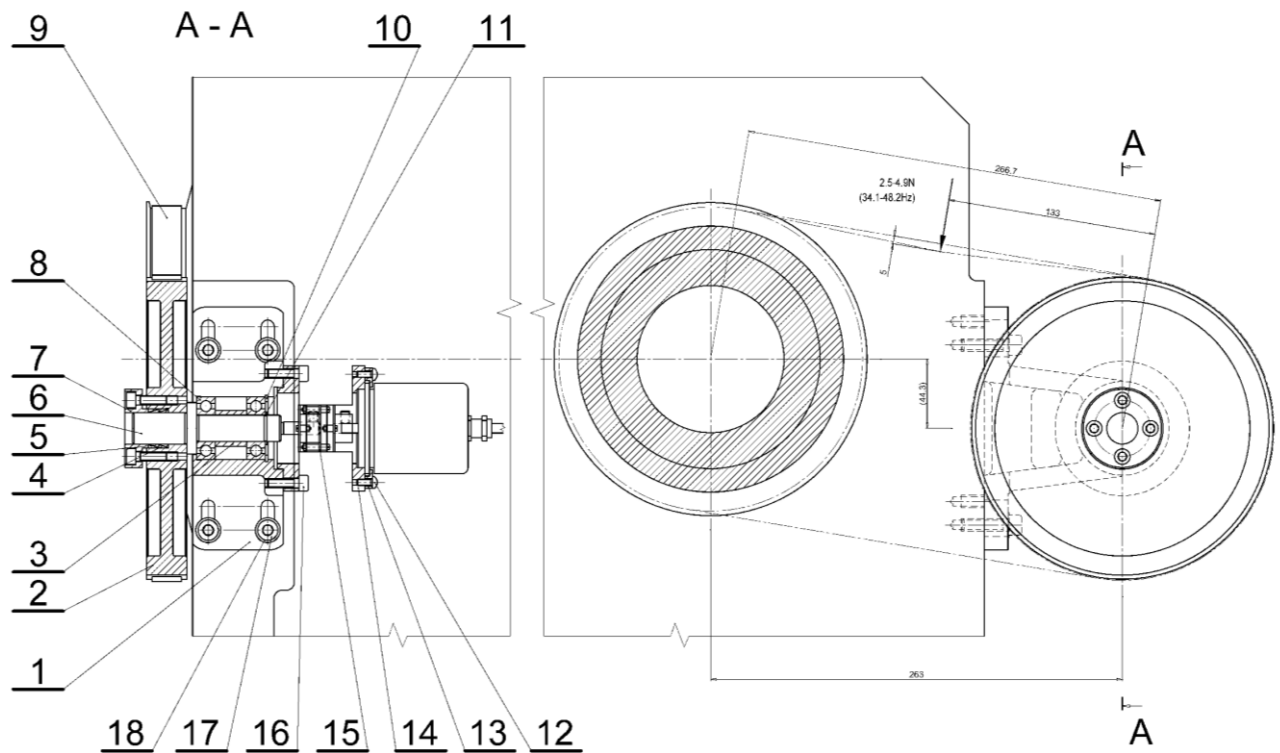


Рисунок 3.15 – Вимірювальний пристрій для контролю швидкості обертання шпинделя

Розрахункова схема дискового гальма шпинделя приведена на рис. 3.16.

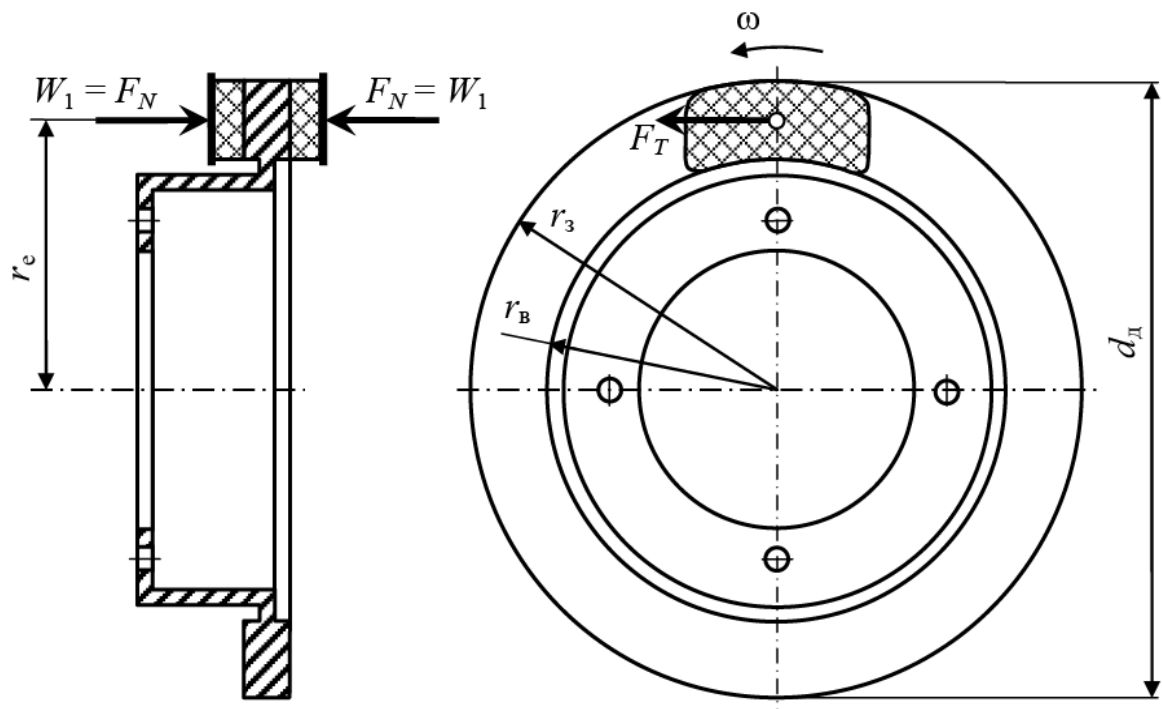


Рисунок 3.16 – Розрахункова схема дискового гальма шпинделя

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ

Арк.

58

Вихідні дані для розрахунку дискового гальма шпинделя:

- діаметр гальмівного диску – $d_d = 340$ мм;
- площа гальмівних колодок – $A = 0,003$ м²;
- гідравлічний тиск в камерах гідравлічних циліндрів $p = 6$ Мпа
- коефіцієнт тертя між гальмівними колодками та диском - $\mu = 0,35$.

Зовнішній радіус поверхні тертя диска [16]:

$$R_3 = d_d/2 = 340/2 = 170 \text{ мм} \quad (3.9)$$

Внутрішній радіус поверхні тертя диска [16]:

$$R_b = (0,7 \dots 0,8) R_3 = 0,7 \cdot 170 = 119 \text{ мм} \quad (3.10)$$

Ефективний радіус поверхні тертя диска [16]:

$$R_e = 2/3 \cdot (R_3^3 - R_b^3) / (R_3^2 - R_b^2) \quad (3.11)$$

Підставивши значення у формулу (3.11) отримаємо:

$$R_e = 2/3 \cdot (170^3 - 119^3) / (170^2 - 119^2) = 146 \text{ мм}$$

Допустимий момент тертя визначається з умови неперевищення допустимого тиску на поверхню накладки [16]:

$$T_{\text{доп}} = 2 \cdot \mu \cdot p \cdot A \cdot R_e \quad (3.12)$$

Підставивши значення у формулу (3.12) отримаємо:

$$T_{\text{доп}} = 2 \cdot 0,35 \cdot 6 \cdot 10^6 \cdot 0,003 \cdot 0,146 = 1839 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Необхідне зусилля затиску

$$W = T_{\text{доп}} / (2 \cdot \mu \cdot R_e) \quad (3.13)$$

Підставивши значення у формулу (3.13) отримаємо:

$$W = 1839 / (2 \cdot 0,35 \cdot 0,146) = 17900 \text{ Н}.$$

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		59

4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1. Інструкція з техніки безпеки при роботі на токарному верстаті з ЧПК

На початок роботи оператору необхідно перевірити наявність і справність огорожень рухомих елементів верстата, струмопровідних частин електричної апаратури і елементів управління, огорожень захисту від стружки і охолоджуючих рідин. Перевірити чи не пошкоджені відкриті ділянки електропроводки, чи не обірваний провідник електричного заземлення верстата, чи справно діють пускові, зупиняючі, реверсивні пристрої, пристрої перемикання швидкостей і фіксатори органів управління, справність різального і допоміжного інструменту та надійність його фіксації у револьверній головці. Робота без захисних огорожень і запобіжних пристроїв і пристосувань заборонена [18, 19].

Перед вмиканням верстата необхідно переконатися, що його пуск буде безпечним.

Токарний верстат з ЧПК - це складний агрегат, що складається з різних механічних вузлів, електричних і електронних компонентів. Для забезпечення безпеки існують загальні правилами безпечної експлуатації токарних верстатів з ЧПК [18, 19]:

1) До експлуатації і ремонту верстата допускається тільки персонал, ознайомлений з відповідною документацією верстата і системи ЧПК.

2) Завжди необхідно користуватися захисними окулярами і спеціальним взуттям. При необхідності використовувати рукавички, пилозахисну маску і засоби захисту слуху.

3) Експлуатація верстата дозволяється лише у тому випадку, якщо ви переконалися, що регулярно здійснювалося обслуговування верстата і що він

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата								
Розробив	Демедюк В.Г.				Безпека життєдіяльності, охорона праці				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевірів	Окіпний І.Б.								Н		60	7
Н. контр.	Кобельник В.Р.											
Затв.	Крупа В.В.								ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м. Тернопіль			

знаходиться у відмінному технічному стані.

4) Необхідно переконатися, що верстат заземлений належним чином.

5) Не приступати до роботи на верстаті, якщо від нього виходить незвичайне або занадто сильне тепло, шум, спостерігається виділення диму або вібрація. При цьому необхідно терміново звернутися до виробників верстата або в сервісну службу.

6) Доступ до електричних компонент верстата дозволяється тільки спеціально навченому персоналу.

7) Не можна застосовувати як очисники і ЗОР отруйні і займисті речовини.

8) Не відкривати захисні дверці і кожухи поки який-небудь з пристроїв верстата знаходиться в русі.

9) Зони навколо верстата мають бути сухими і добре освітленими.

10) Перед закріпленням інструменту необхідно переконатися, що усі поверхні пристрою кріплення інструменту чисті.

11) Не застосовувати у верстаті зношені, крихкі і дефектні інструменти.

12) Не перевищувати номінальну потужність верстата.

13) Не залишати інструмент і деталі в місцях, в яких вони могли б зіткнутися з рухомими частинами верстата.

14) Регулярно перевіряти рівень мастила і охолоджуючих рідин.

15) Під час обробки не здійснювати налагодження інструменту або закріплення деталей.

16) Підтримувати досить безпечну відстань до усіх точок «затискання» (місць вигину шлангів і дротів) і уникати небезпечних ситуацій.

17) Обов'язково знати розташування клавіш аварійної зупинки верстата.

18) Не залишати верстат без нагляду під час його роботи.

19) При контакті з обробленими деталями звертати увагу на наявність гострих кромek.

20) Не видаляти стружку голими руками. Для цього потрібно використовувати гачок або інше пристосування, переконавшись в повній зупинці

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		61

частин верстата. Не виконувати очищення верстата за допомогою повітряного шланга.

21) Не потрібно намагатися зупинити або загальмувати переміщення виконавчих органів верстата голими руками або за допомогою пристосувань.

22) Не застосовувати для кріплення інструменту і заготовки дефектні або брудні патрони, утримувачі і пристосування.

23) Забороняється робити які-небудь конструктивні зміни верстата без узгодження з виробником верстата або сервісною службою.

24) Не допускати, щоб при роботі з верстатом оператора відволікали інші люди.

26) Ні в якому разі не здійснювати на верстаті операцій, які незрозумілі. У разі сумнівів обов'язково проконсультуватися з фахівцем.

27) Ніколи не працювати усередині верстата, якщо хто-небудь працює із стійкою ЧПУ. Перейти в режим редагування для запобігання випадковому переміщенню виконавчих органів верстата.

28) Потрібно приділяти особливу увагу переміщенням на прискореній подачі. Дотримуйте безпечну відстань над поверхнею заготовки для таких переміщень.

29) Перед початком обробки необхідно перевірити керуючі програми усіма доступними способами.

4.2. Розроблення заходів з безпеки життєдіяльності при роботі на токарному верстаті з ЧПК

При вирішенні завдання досягнення комфортних умов існування людини в навколишнім середовищі, що змінюється, можливі чотири різних стратегії: охорона навколишнього середовища від наслідків господарської діяльності людини; охорона й ізоляція людини від навколишнього середовища, що змінилося; розробка й впровадження методів індивідуальної й групової адаптації людини до середовища, що змінюється; цілеспрямоване формування середовища, оптимально пристосованого до життя людини [18, 19].

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		62

Відомо, що однією із необхідних умов здорової і високопродуктивної роботи є забезпечення чистоти повітря і нормальних метеорологічних умов в робочих приміщеннях [18, 19].

До основних джерел забруднення, що створює даний проєктований верстат можна віднести: змашувально-охолоджуюча рідина (ЗОР); пари охолоджуючої рідини; надлишкове тепло; пил, який утворюється при обробці [18, 19].

Ці шкідливі речовини проникає в організм людини головним чином через дихальні шляхи, наприклад змашувально-охолоджуюча рідина.

При механічній обробці на робітників впливають шкідливі виробничі чинники: метеорологічні; шумові; вібраційні [18, 19].

Метеорологічні умови, або мікроклімат, у виробничих приміщеннях визначаються наступними параметрами: 1) температура повітря t ($^{\circ}\text{C}$); 2) відносна вологість ψ (%); 3) швидкість руху повітря на робочому місці v (м/с) [18, 19].

При високій температурі повітря в приміщенні кровоносні судини шкіри розширюються, при цьому відбувається підвищений приплив крові до поверхні тіла, і тепловіддача в довкілля значно збільшується. При пониженні температури навколишнього повітря реакція людського організму інша: кровоносні судини звужуються, приплив крові до поверхні тіла сповільнюється, і віддача теплоти конвекцією випромінюванням зменшується. Таким чином, для теплового самопочуття людини важливо певне поєднання температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні [18, 19].

Вологість повітря чинить великий вплив на терморегуляцію організму. Підвищена вологість ($\psi > 85\%$) утрудняє терморегуляцію із-за зниження випару поту, а занадто низька вологість ($\psi < 20\%$) викликає пересихання слизових оболонок дихальних шляхів. Оптимальні величини відносної вологості складають 40 - 60% [18, 19].

Мінімальна швидкість руху повітря, що відчувається людиною, складає 0,2 м/с. В зимову пору року швидкість руху повітря не повинна перевищувати 0,2 - 0,5 м/с, а влітку – 0,2 - 1,0 м/с. В гарячих цехах допускається збільшення швидкості повітря до 3,5 м/с. [18, 19].

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		63

Засобами, які зменшують забруднення повітря в робочій зоні отруйними парами, пилом, забезпечують необхідну температуру, вологість і швидкість руху повітря, є вентиляція і опалювання. У приміщеннях на одного робітника при об'ємі менше 20 м³ встановлюється вентиляція, що забезпечує повітрообмін не менше 30 м³/год на працюючого; при об'ємі 20-40 м³ - не менше 20 м³/год; тільки при об'ємі 40 м³ на працюючого допускається провітрювання приміщення [18, 19].

У виробничому цеху встановлюється природна і штучна вентиляція. При недоліку природної вентиляції застосовується штучна. Вона поділяється на наступні види: загальнообмінну, витяжну, припливно-витяжну і комбіновану [18, 19].

Розрізняють системи повітряного опалювання і системи опалювання з нагрівальними приладами: радіатори, батареї, труби. Повітряне опалювання здійснюється по засобах нагріву припливного повітря і його наступного перемішування [18, 19].

Виробничі цехи (дільниці) забезпечуються достатньою освітленістю робочих місць. У світлий час доби забезпечується природне освітлення, при його нестачі застосовується штучне місцеве. Природне освітлення цеху здійснюється через віконні отвори. Штучне освітлення буває двох видів: загальне, яке здійснюється світильниками, розташованими у верхній частині будівлі і місцеве, яке здійснюється за рахунок світильників, розташованих безпосередньо на робочому місці. Вони мають світловідбивачі, захисний кут яких не менше 30° [18, 19].

Аварійне освітлення використовується для продовження роботи і евакуації людей при раптовому відключенні робочого освітлення [18, 19].

Шум - пружні коливання в частотному діапазоні чутності людини, такі, що поширюються у вигляді хвилі в газоподібних середовищах. Максимальний рівень звуку для шуму не повинен перевищувати 80 дБА (дБ) [18, 19].

Будівельно-акустичні методи захисту від шуму [18, 19]:

а) звукоізоляцією конструкцій, що захищають, ущільненням притворів вікон, дверей, комор і т.п.

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		64

б) установкою в приміщеннях і на шляху поширення шуму звукопоглинальних конструкцій і екранів.

в) застосуванням глушників аеродинамічного шуму двигуна внутрішнього згорання і компресорах і т.д.

г) створенням шумозахисних зон в різних місцях знаходження людей, використання екранів і зелених насаджень.

Вібрація виникає під дією внутрішніх або зовнішніх динамічних сил, викликаних поганим балансуванням рухомих частин машин та таких, що обертаються, ударними процесами технологічного характеру [18, 19].

Заходи по захисту від вібрації підрозділяють на технічні, організаційні і лікувально – профілактичні [18, 19].

До технічних заходів відносять усунення вібрацій в джерелі на шляху їх поширення. До організаційних заходів по боротьбі з вібрацією відносять раціональне чергування режимів праці і відпочинку. До лікувально-профілактичних заходів відносять виробничу гімнастику, ультрафіолетове опромінення, повітряний обігрів, масаж, теплі ванни для рук і ніг, прийом вітамінних препаратів для рук і ніг [18, 19].

Механообробка ведеться із застосуванням змащувально-охолоджувальних технологічних засобів (ЗОТЗ). Основними несприятливими чинниками з гігієнічної точки зору є виділення в повітря дрібнодисперсного аерозолі і продуктів термічного розкладання компонентів ЗОТС [18, 19].

Вони можуть чинити дратівливу дію на слизові оболонки верхніх дихальних шляхів. Окрім цього ЗОТС можуть чинити подразливу дію на шкіру робітника при забрудненні спецодягу, і на відкриті частини тіла, тому потрібні заходи профілактики [18, 19].

Дана СОЖ у виробництві використовується розбавленою з водою до 3-5% розчину. Тому він відноситься до 4 класу небезпеки (малонебезпечні), його ГДК 10 міліграм/м³ [18, 19].

Заходи по запобіганню виникненню небезпек від застосування ЗОР наступні [18, 19]:

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		65

- для запобігання витоку газів шкідливих речовин в атмосферу застосовують регулювання механізмів подачі ЗОР;
- для скорочення їх вмісту в повітрі використовують вентиляцію;
- як захист рук від ЗОР рекомендується використовувати пасту ИЭР-2 або крем силіконовий, біологічні рукавички.

					<i>КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз технічних вимог до ступінчатого довгого валу, як об'єкту виробництва.
2. Приведено призначення і короткий опис токарного патронно-центрального верстата з ЧПК, його технологічних можливостей, компоновки та основних вузлів і механізмів.
3. Приведено призначення приводів кутового позиціонування шпинделя. Проаналізовано конструкції механізмів кутового позиціонування шпинделя від двигуна приводу головного руху та від окремого сервоприводу.
4. Вибрано напрям модернізації приводу головного руху токарного верстата з ЧПК для комплексної токарної обробки, який базується на кутовому позиціонуванні шпинделя від двигуна приводу головного руху та введенні додаткових механізмів гальмування та контролю положення шпинделя.
5. Спроектовано операційну технологію комплексної обробки ступінчатого довгого валу на токарному верстаті з ЧПК з модернізованим приводом головного руху з можливістю кутового позиціонування шпинделя.
6. Вибрано різальний, допоміжний та контрольно-вимірювальний інструмент для комплексної токарної операції з ЧПК, а також вибрано для неї режими різання.
7. Вибрано структуру модернізованого приводу головного руху із кутовим позиціонуванням шпинделя від головного двигуна. Проведено кінематичний розрахунок модернізованого приводу головного руху та вибір електродвигуна. В якості привідного двигуна вибраний асинхронний частотно-регульований електродвигун з примусовим охолодженням мод. 1PH7 163 NF0 фірми SIEMENS з потужністю 30 кВт.
8. Розроблено конструкцію шпиндельного вузла модернізованого приводу

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Висновки				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Розробив	Демедюк В.Г.								Н		67	2
Перевірів	Волошин В.Н.											
Н. контр.	Кобельник В.Р.											
Затв.	Крупа В.В.				ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м.Тернопіль							

головного руху, розроблено компоувальну схему шпиндельного вузла та здійснено вибір підшипників опор шпинделя.

9. Проведено розрахунок осьової та радіальної жорсткості шпиндельного вузла, як статично-невизначеної системи, з використання пакета прикладних програм MathCAD. За результатами розрахунку осьова жорсткість шпиндельного вузла становить 104 Н/мкм; радіальна жорсткість шпиндельного вузла – 186 Н/мкм.

10. Розроблено конструкцію механізму кутового позиціонування шпинделя від двигуна приводу головного руху, що забезпечує кутове позиціонування та безперервну колову подачу. Проведено розрахунок дискового гальма шпинделя.

11. Вирішені питання охорони праці та безпеки життєдіяльності.

					<i>КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		68

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кузнєцов Ю.М. Технологічне оснащення для високоефективної обробки деталей на токарних верстатах: монографія// Ю.М. Кузнєцов, І.В. Луців, О.В. Шевченко, В.Н. Волошин – К.: - Тернопіль: Терно-граф, 2011. – 692 с.
2. Керівництво по експлуатації токарного верстату з програмним керуванням SPU 40 CNC – АО «KOVOSVIT». – 85 с.
3. Brecher C., Weck M. Machine Tools Production Systems 2. Design, Calculation and Metrological Assessment – Berlin: Springer-Verlag GmbH, 2021 – 840 p.
4. Hirsch A. Werkzeugmaschinen. Grundlagen, Auslegung, Ausführungsbeispiele – Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2012. – 439 s.
5. Neugebauer R Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen. – Berlin: Springer-Verlag GmbH, 2012 – 478 s.
6. Кузнєцов Ю. М. Технологічне обладнання з ЧПК: механізми і оснащення: Навч. посібник для студентів вищих навчальних закладів / Ю.М. Кузнєцов, О.Ф. Саленко, О.О. Харченко, В.Т. Щетинін. – К.: - Кременчук: Точка, 2014. - 500 с.
7. Обладнання для новітніх технологій: навчальний посібник / В.В. Солоха, Л.Й. Івченко, І.А. Бойко, В.Ю. Коцюба, В.Л. Карнаух. – Запоріжжя: ПАТ «Мотор Січ», 2020. – 210 с.
8. Добрянський, С. С. Технологічні основи машинобудування [Електронний ресурс] : підручник для студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / С. С. Добрянський, Ю. М. Малафєєв ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 13,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 379 с.

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата				
Розробив	Демедюк В.Г.				Перелік посилань		Літ.	Аркуш
Перевірів	Волошин В.Н.						Н	Аркушів
								69
Н. контр.	Кобельник В.Р.							3
Затв.	Крупа В.В.						ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м. Тернопіль	

9. Технологія машинобудування. Посібник довідник для виконання кваліфікаційних робіт. Навч. посібник / І.І. Юрчишин, Я.М. Литвиняк, І.Є. Грицай, М.Л.Кукляк, Я.М. Кусий, В.В. Ступницький, В.А. Яцюк, А.М.Кук, Є.М.Махоркін, В.П. Свіхінський// За ред. І.І. Юрчишина. – Львів: Видавництво національного університету «Львівська політехніка» , 2009. –528 с.

10. Технологія обробки на верстатах з ЧПК: навч. посіб./ Б.М. Гевко та ін. – м. Тернопіль: Крок, 2014. 131 с.

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

12. Ревнівцев М.П. Режими різання на металообробних верстатах у машинобудуванні / М.П. Ревнівцев, Н.П. Паршина. – Київ: А.С.К., 2006. – 416с.

13. Електронний каталог різальних інструментів фірми Kennametal [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.kennametal.com/us/en/products/metalworking-tools/turning/od-and-id-turning.html> (дата звернення: 10.06.2025).

14. Двигуни головного руху 1PH7 з примусовим охолодженням [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.avigan.com.ua/page/dvigateli-glavnogo-dvizheniya-1ph7-s-prinuditel-nym-ohlazhdeniem/mp/2466/> (дата звернення: 30.05.2025).

15. Верба І.І., Даниленко О.В. Статичний розрахунок шпиндельних вузлів на опорах кочення: Методичні вказівки до виконання розрахунків у дипломних проектах та курсових проектах з дисциплін «Металорізальні верстати», Металорізальні верстати та обладнання автоматизованого виробництва», «Конструювання обладнання металообробних цехів» для студентів напряму підготовки 6.050503, спеціальностей «Металорізальні верстати та системи» та «Інструментальне виробництво» і спеціальностей 7.05050201, 8.05050201 «Технологія машинобудування». Частина 1. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. – 104 с.

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

16. Писаренко Г.С. Опір матеріалів: Підручник/ Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський – К.: Вища школа, 2004. – 665с.

17. Проектування робочої гальмової системи легкового автомобіля: Методичні вказівки до курсового проекту з дисципліни «Експлуатаційна ефективність автомобіля» для студентів спеціальності 7.090258 «Автомобілі та автомобільне господарство»/ Укл. П.М. Гащук, Т.Г. Миськів. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007. – 32 с.

18. Голубенко О.Л., Касьянов М.А., Гунченко О.М. Охорона праці в машинобудівному виробництві. Підручник. – Луганськ. Східноукраїнський університет ім. В. Даля, 2010 – 456.с.

19. Пістун І.П., Стець Р.Є., Трунова І.О. Охорона праці в галузі машинобудування. Навчальний посібник (стереотипне видання) – Суми: Університетська книга, 2023 – 556 с.

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

21. Кривий П.Д., Кобельник В.Р., Вплив головного заднього кута спірального свердла на осьове зусилля і крутний момент при свердлінні. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. : Краматорськ, Київ, 2006.Вип. № 19. С. 58–64.

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

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ	Арк.
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ДОДАТКИ

					КРБ 22-075.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата				
Розробив	Демедюк В.Г.				Додатки			
Перевірів	Волошин В.Н.							
Н. контр.	Кобельник В.Р.							
Затв.	Крупа В.В.							
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
					Н		72	6
					ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м.Тернопіль			