

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Удосконалення конструкції супорта токарно-гвинторізного верстата для забезпечення обробки сферичних поверхонь

Виконала: студентка 2 курсу, групи МВмз-61

напряму підготовки (спеціальності)

133 «Галузеве машинобудування»

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Швед Ю.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Кобельник В.Р.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Кобельник В.Р.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завід. 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.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

(шифр і назва спеціальності)

студенту Швед Юлії Віталіївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення конструкції супорта токарно-гвинторізного верстата для забезпечення обробки сферичних поверхонь

Керівник роботи Кобельник Володимир Романович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 15 » 08 2025 року № 4/7-757

2. Термін подання студентом завершеної роботи 19.12.2025

3. Вихідні дані до роботи

Токарно-гвинторізні верстати-аналоги. Конструкції напрямних. Конструкції черв'ячних передач. Деталі-представники, що містять поверхні х елементами сфери.

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

Вступ. Аналіз завдання та вибір напрямку роботи. Оптимізація компоновочної та розробка структурно-кінематичної схем верстата. Вибір та аналіз технічних характеристик верстатів-аналогів. Вибір деталі представника для обробки. Уточнення службового призначення верстата. Аналіз та вибір виконавчих рухів для забезпечення технологічного процесу. Вибір основних технічних параметрів верстата. Оптимізація компоновальної схеми верстата. Обґрунтування модулів верстата. Побудова загальної матриці компоновки верстата. Формування умов відбору. Математичний вибір можливих компоновок верстата. Вибір та опис принципової структурно – кінематичної схеми обладнання. Технологічний розрахунок. Дослідно-проектний розділ. Проектування та розрахунок шпindelного вузла. Розрахунок оптимальної міжосьової відстані між опорами вузла. Розрахунок жорсткості ШВ. Розрахунок радіальної жорсткості ШВ. Розрахунок осьової жорсткості ШВ. Динамічний розрахунок ШВ. Розрахунок тягового пристрою. Розробка розрахункової схеми. Розрахунок тягового пристрою за критерієм жорсткості. Розрахунок напрямних. Конструктивне виконання. Розрахунок деформації і контактних тисків (напружень) напрямних. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Перелік посилань. Додаток.

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

Тема, мета роботи, завдання. Кінематична схема верстата. Структурні сітки та графіки чисел обертів (подач) приводів головного руху та руху подач. Аналіз компоновок верстата. Шпindelний вузол. Конструкція каретки з механізмом, що забезпечує поворот. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., доцент каф. ВІ Сеник А.А.		
Безпека в надзв. ситуаціях	асист. каф. ОХ Теслюк В.М.		

7. Дата видачі завдання 15.08.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз завдання на кваліфікаційну роботу	25.08.2025	
2	Аналіз завдання та вибір напрямку роботи	11.11.2025	
3	Оптимізація компоновочної та розробка структурно-кінематичної схем верстата	10.12.2025	
4	Дослідно-проектний розділ	15.12.2025	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	16.12.2025	
6	Висновки	19.12.2025	
7	Графічна частина (Слайди)	19.12.2025	
8	Підготовка до захисту	до 25.12.2025	

Студент

(підпис)

Швед Ю.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Кобельник В.Р.

(прізвище та ініціали)

Швед Ю.В. Удосконалення конструкції супорта токарно-гвинторізного верстата для забезпечення обробки сферичних поверхонь // Швед Юлія Валеріївна : кваліфікаційна робота магістра : наук. кер. В.Р. Кобельник. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль : 2025. 103 с.

Ключові слова: верстат, шпиндельний вузол, супорт верстата.

В кваліфікаційній роботі розглянуто варіанти схем формоутворення поверхонь деталі представника за умови їх обробки на токарному верстаті, проведено оптимізацію компоновочної схеми токарного верстата з можливістю обробки поверхонь які містять елементи сфери, розроблено структурно кінематичну схему верстата, внесено зміни до кінематичної схеми верстата які дають можливість додаткового руху різального інструменту, розроблено удосконалену конструкцію каретки з додатковою можливістю провороту від черв'ячної передачі. Проведено розрахунок напрямних, передачі гвинт-гайка ковзання та шпиндельного вузла верстату.

Swed Yu.V. Improvement of the carriage design of a screw-cutting lathe to enable the machining of spherical surfaces. Thesis work for obtaining the educational qualification of Master degree of specialty 133 - Industrial machinery engineering; Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University; Ternopil, 2025.

Key words: machine tool, spindle assembly, machine tool support.

The work considers variants of the surface shaping schemes of the representative part provided that they are processed on a lathe, optimization of the layout scheme of the lathe with the possibility of processing surfaces containing sphere elements was carried out, a structural kinematic scheme of the machine was developed, changes were made to the kinematic scheme of the machine that allow additional movement of the cutting tool, an improved carriage design was developed with the additional possibility of rotation from the worm gear. Calculation of the guides, screw-nut transmission of the slide and the spindle assembly of the machine was carried out.

ЗМІСТ

стор.

Вступ.....	
1. Аналіз завдання та вибір напрямку роботи.....	
2. Оптимізація компоновочної та розробка структурно-кінематичної схем верстата.....	
2.1 Вибір та аналіз технічних характеристик верстатів-аналогів	
2.2 Вибір деталі представника для обробки.....	
2.3. Уточнення службового призначення верстата. Аналіз та вибір виконавчих рухів для забезпечення технологічного процесу.....	
2.4. Вибір основних технічних параметрів верстата.....	
2.5.Оптимізація компонуванняльної схеми верстата.....	
2.5.1Обґрунтування модулів верстата.....	
2.5.2. Побудова загальної матриці компоновки верстата.....	
2.5.3 Формування умов відбору.....	
2.5.4 Математичний вибір можливих компоновок верстата.....	
2.6 Вибір та опис принципової структурно – кінематичної схеми обладнання	
2.7 Технологічний розрахунок.....	
3 Дослідно-проектний розділ.....	
3.1 Проектування та розрахунок шпиндельного вузла.....	
3.1.1 Розрахунок оптимальної міжосьової відстані між опорами вузла.....	
3.1.2 Розрахунок жорсткості ШВ.....	
3.1.2.1 Розрахунок радіальної жорсткості ШВ.....	
3.1.2.2 Розрахунок осьової жорсткості ШВ.....	
3.1.3 Динамічний розрахунок ШВ.....	
3.2 Розрахунок тягового пристрою.....	
3.2.1 Розробка розрахункової схеми	
3.2.2 Розрахунок тягового пристрою за критерієм жорсткості	
3.3 Розрахунок напрямних.....	

3.3.1 Конструктивне виконання.....	
3.3.2 Розрахунок деформації і контактних тисків (напружень) напрямних...	
4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	
4.1 Інструкція по техніці безпеки.....	
4.2 Організація робочого місця.....	
4.3 Оцінка стійкості роботи промислового підприємства до впливу уражаючих факторів ядерної зброї.....	
Висновки.....	
Перелік посилань.....	
Додаток	

Вступ

Модернізація сучасного обладнання має бути спрямована на інтенсифікацію робочих та допоміжних процесів, що вимагає пропорційного збільшення потужності головного приводу. Особливого значення сьогодні набуває зміцнення експлуатаційної надійності верстатів через їх оснащення сучасними датчиками контролю, вимірювальними приладами та інтегрованими системами моніторингу стану.

Зростання швидкостей виконання операцій безпосередньо залежить від подальшого розвитку приводних систем, шпиндельних вузлів, тягових механізмів та лінійних напрямних. Завдяки використанню інструментів із композиційних матеріалів уже сьогодні досягаються швидкості різання до 1,5–2 км/хв при подачі 20–30 м/хв. Однак подальший поступ у цьому напрямку потребує розробки принципово нових конструкцій, які базуються на інших фізичних принципах і гарантують високу працездатність ключових вузлів обладнання.

Сучасне металообробне устаткування забезпечує виняткову прецизійність виготовлення деталей. Найважливіші поверхні механізмів обробляються з похибкою, що вимірюється в частках мікрометра, а за умови використання алмазного точіння показник шорсткості не перевищує кількох сотих часток мікрона. Постійне підвищення стандартів точності в машинобудуванні ставить перед галуззю нові складні виклики у сфері високоточного верстатобудування.

Фахівці, які працюють у царині технологій машинобудування та інструментального виробництва, відіграють ключову роль у забезпеченні загального науково-технічного прогресу.

Головним завданням є фундаментальне оновлення технологічних процесів, створення автоматизованого обладнання з мікропроцесорним керуванням та розробка модулів для гнучких виробничих систем. Це дозволить провести повне технічне й організаційне переозброєння машинобудівного

комплексу, що стане основою для суттєвого зростання продуктивності праці. Для ефективної діяльності інженери-конструктори повинні мати ґрунтовну підготовку з математики, фізики та обчислювальної техніки, володіти загальноінженерними навичками та досконало знати професійну специфіку. Необхідно чітко розуміти ключові технічні характеристики та властивості верстатів, щоб створювати найбільш досконалі та інноваційні моделі обладнання.

1. Аналіз завдання та виріб напрямку роботи.

Завданням ставиться мета модернізувати конструкцію токарно-гвинторізного верстата для забезпечення механічної обробки циліндричної деталі зі сферичною формою.

Вихідними даними на розробку проекту верстата є робоче креслення деталі-представника, програма випуску деталі, базова модель верстата і технічні умови на виготовлення, які чинять певний вплив на формування компоновки конструкції, кінематики верстата в цілому і окремих його вузлів.

Робоче креслення деталі-представника дає інформацію про її габаритні розміри, конструктивно-технологічні особливості. Дана інформація впливає на зону формоутворення поверхонь деталі зумовлює картину варіантів розміщення різального інструменту та заготовки, характер закріплення їх на верстаті, формує комплекс формоутворюючих рухів, виконавчих механізмів верстата і в загальному є основною по формуванню компоновок.

Технічні умови на виготовлення деталі-представника (виготовлення деяких поверхонь) впливають на якісні параметри режимів різання, а це в свою чергу є основним фактором на формування кінематики приводу основних виконавчих вузлів та їх конструктивне виконання.

Певний вплив на проектно-конструкторські особливості верстата чинить орієнтовна продуктивність або річна програма обробки деталі на верстаті.

Орієнтація на певний тип виробництва вимагає пошук шляхів по підвищенню продуктивності верстата, яка може бути досягнута за рахунок ряду чинників, а саме: використання прогресивного різального інструмента з механізмом застосування багатопозиційності у верстаті, використання прогресивних методів обробки і т.д.

На основі приведених вище міркувань, мети завдання на проект та вихідних даних намічаємо певний напрямок роботи.

Стосовно вихідних даних на проект передбачаємо провести оптимізацію формоутворення циліндричних і сферичних поверхонь у деталях типу ”Корпус

підшипника”. На основі деталі представника, технічних умов на виготовлення і оптимальної схеми формоутворення провдиморозрахунок режимів різання, які стануть основними для кінематичного та силового розрахунків окремих вузлів і верстата в цілому. Робоче креслення деталі і оптимальна схема формоутворення є також домінуючими при формуванні компонованої схеми верстата. Всі конструкторські розробки повинні отримати всебічне обґрунтування різного роду розрахунками.

Проектну розробку верстата необхідно також обґрунтувати організаційно-економічними розрахунками про його доцільність та ефективність, вона повинна відповідати основним вимогам охорони праці та безпеки експлуатації в умовах виробництва.

2. Оптимізація компоновочної та розробка структурно-кінематичної схем верстата

2.1 Вибір та аналіз технічних характеристик верстатів-аналогів

Токарний токарно-центровий верстат моделі 16K20Ф3.

Найбільший діаметр обточувальної заготовки, мм:

Над станиною	400
Над супортом	200
Кількість інструментів	6
Кількість частоти обертання шпинделя	12
Частота обертання шпинделя, хв^{-1}	35-1600
подача, мм/хв:	
поздовжня	3-200
поперечна	3-500
Швидкість швидких переміщень, мм/хв.	
Поздовжніх	4800
Поперечних	2400
Дискретність переміщень, мм:	
Поздовжніх	0,01
Поперечних	0,005
Габаритні розміри верстата, мм:	
Довжина	3360
Висота	1710
Ширина	1750

Токарний верстат мод. 16Б04А.

Найбільший діаметр оброблювальної заготовки, мм:

Над станиною	200
Над супортом	115

Найбільший діаметр прутка, який проходить через шпинделя, мм	14
Найбільша довжина оброблюваної заготовки, мм	350
Крок нарізаємої різі:	
Метричної	0,2-2,8
Дюймової	96-5
Модульної	0,1-14
Частота обертання шпинделя, об/хв.	3200
Кількість швидкостей шпинделя.	Б/С
Подача супорта, мм/об	0,175
Поздовжня	0,01-
Поперечна	0,005-0,09
Кількість ступеней подач	—
Потужність електродвигуна, кВт	1,1
Габаритні розміри, мм	
Довжина	1310
Ширина	690
Висота	300
Маса, кг	2835-3685

Токарний верстат 16Т02А.

Найбільший діаметр оброблювальної заготовки, мм:	
Над станиною	125
Над супортом	75
Найбільший діаметр прутка, який проходить через отвір шпинделя, мм	8
Найбільша довжина оброблювальної заготовки, мм	50
Частота обертання шпинделя, об/хв.	320-3200
Кількість швидкостей шпинделя	6
Найбільше переміщення супорта, мм:	

Поздовжнє	65
Поперечне	60
Потужність електродвигуна, кВт	0,27
Габаритні розміри, мм	
Довжина	695
Ширина	520
Висота	300
Маса, кг	3500

Токарний патронно-центровий верстат мод. 1А670.

Найбільший діаметр оброблюваної заготовки, мм	
Над станиною	2000
Над супортом	1600
Найбільша довжина оброблюваної заготовки, мм	10000
Крок нарізаємої різі:	
Метричної	2,0-384
Дюймової	—
Модульної	—
Частота обертання шпинделя, об/хв.	1-125
Кількість швидкостей шпинделя	Б/С
Найбільше переміщення супорта	
Поздовжнє	10400
Поперечне	715
Кількість ступеней подач	—
Потужність електродвигуна, кВт	100
Габаритні розміри, мм:	
Довжина	22200
Ширина	4300
Висота	2850

Маса, кг

120000

2.2. Вибір деталі представника для обробки.

Кількісна оцінка технологічності деталі може бути здійснено лише при використанні відповідних базових показників технологічності. Впродовж дипломного проектування студент повинен провести технологічний контроль вихідної конструкторської документації і аналіз деталі на технологічність. В проекті необхідно визначити значення коефіцієнтів точності, металомісткості, та шорсткості, які повинні бути в межах:

$0,9 < K < 1$ (ГОСТ 14.202-73)

Коефіцієнт точності:

$$K_{m.ч.} = 1 - \frac{1}{T_{cp}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \Pi_i}{\sum_{i=1}^n T n_i}$$

$$\text{де } T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n T n_i}{\sum_{i=1}^n \Pi_i} = \frac{\Pi_1 + 2\Pi_2 + 3\Pi_3 + \dots}{\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \dots} - \text{середній квалітет обробки деталі}$$

Π_i - кількість розмірів відповідного квалітету точності

T - квалітет точності

$$T_{cp} = \frac{9 \cdot 1 + 10 \cdot 2 + 12 \cdot 1}{4} = 10,25$$

Тоді $K_{mu} = 1 - 1/10,25 = 0,9$

Коефіцієнт металомісткості.

$$K_M = M_d / M_3$$

$$M_d = V_d \cdot \rho; \quad M_3 = V_3 \cdot \rho$$

де M_d - маса деталі, кг

M_3 - маса заготовки, кг

V_d - об'єм деталі, мм³

V_3 -об'єм заготовки, мм³

ρ – густина матеріалу, кг/см³

Знайдемо об'єм деталі і заготовки (за допомогою розбивання площин деталі і заготовки на елементарні ділянки геометричним способом)

$$V_d = V_3 - \pi R^2 \cdot L - 1/2 H \cdot l$$

$$V_3 = 125 \cdot 175 \cdot 40 = 875000 \text{ мм}^3$$

$$V_d = 875000 - 3,14 \cdot 25^2 \cdot 35 - 1/2 \cdot 10 \cdot 90 = 805862 \text{ мм}^3$$

$$K_M = \frac{M_d}{M_3} = \frac{V_d \cdot \rho}{V_3 \cdot \rho} = \frac{V_d}{V_3} = \frac{805862}{875000} = 0,92$$

Коефіцієнт шорсткості:

$$K_u = \frac{1}{\overline{Ш}_{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Pi_{im}}{\sum_{i=1}^n \overline{Ш}_{nim}}$$

де $\overline{Ш}_{cp}$ - середній квалітет шорсткості поверхні деталі.

$$Ш_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n Ш_{iM}}{\sum_{i=1}^n П_{iM}} = \frac{П_1 + 2 \cdot П_2 + 3 \cdot П_3 + \dots}{П_1 + П_2 + П_3 + \dots}$$

Ш- квалітет шорсткості деталі.

П_{іМ}-кількість поверхонь відповідного квалітету шорсткості.

$$Ш_{cp} = \frac{2 \cdot 1 + 3 \cdot 4}{1 + 4} = 2,8$$

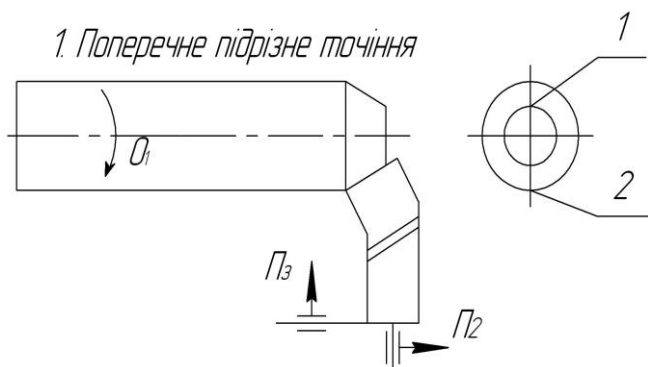
Тоді $K_{ш} = 1/2,8 = 0,35$

2.3. Уточнення службового призначення верстата. Аналіз та вибір виконавчих рухів для забезпечення технологічного процесу

Верстат токарний спеціальний призначений для обробки зовнішніх та внутрішніх сферичних поверхонь, а також для виконання самих різноманітних робіт в патроні і центрах, і нарізання метричної, і дюймової різей.

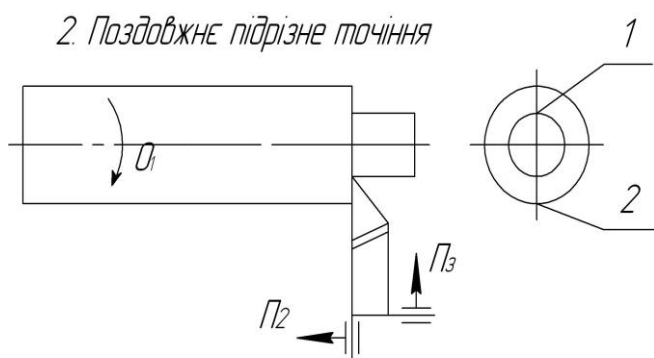
Розглянемо комплекс рухів необхідних по забезпеченню виробничого циклу на верстаті:

- а) обробка зовнішніх поверхонь
 - точіння простих поверхонь

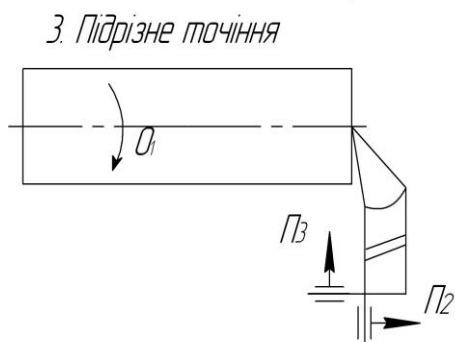


Інструменти: прохідний різець підрізного типу, підрізний різець, відрізний різець.

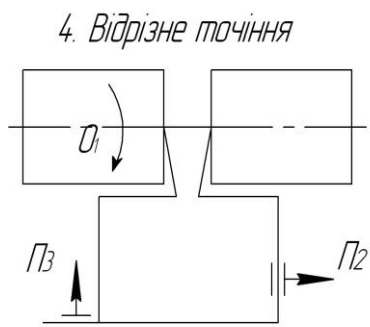
1 – твірна, метод сліду $\Phi=1$; $\Phi_s(\Pi_3)$.
2 – направляюча, метод сліду $\Phi=1$; $\Phi_v(O_1)$; $\Phi_\Sigma=2$; $\Phi_v(O_1)$; $\Phi_s(\Pi_3)+Y_{ct}(\Pi_2)$.



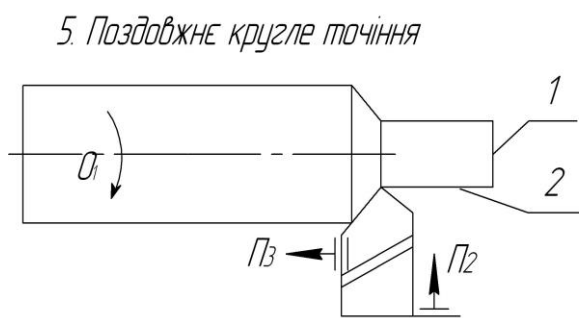
1-твірна, метод копіювання $\Phi=0$
2-направляюча, метод сліду $\Phi=1$ $\Phi_v(O_1)$
 $\Phi_\Sigma=1$: $\Phi_v(O_1)+B_p(\Pi_2)+Y_{ct}(\Pi_3)$.



Метод сліду – сліду
 $\Phi_\Sigma=2$: $\Phi_v(O_1)+\Phi_s(\Pi_3)+Y_{ct}(\Pi_2)$.



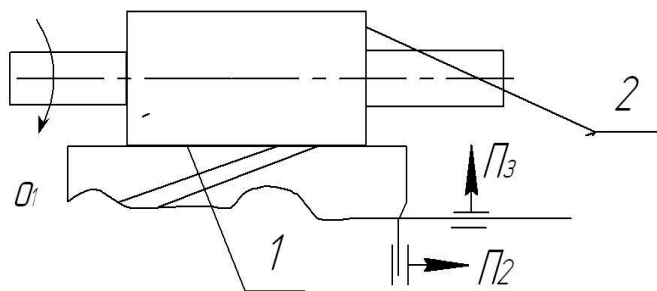
Метод сліду – сліду
 $\Phi_\Sigma=2$: $\Phi_v(O_1); \Phi_s(\Pi_3)+Y_{ct}(\Pi_2)$.



-точіння круглоциліндричних поверхонь
1-метод сліду $\Phi=1$, $\Phi_v(O_1)$
2-метод сліду $\Phi=1$, $\Phi_s(\Pi_2)$
 $\Phi_\Sigma=2$: $\Phi_v(O_1); \Phi_s(\Pi_2)+Y_{ct}(\Pi_3)$.

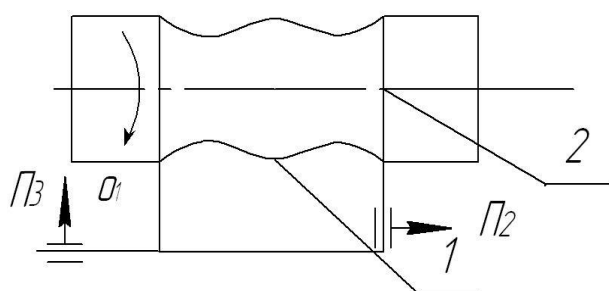
1 – метод копіювання $\Phi=0$
2 – метод сліду $\Phi=1$ $\Phi_v(O_1)$
 $\Phi_\Sigma=1$: $\Phi_v(O_1)+B_p(\Pi_3)+Y_{ct}(\Pi_3)$.

2. Поперечне кругле точіння



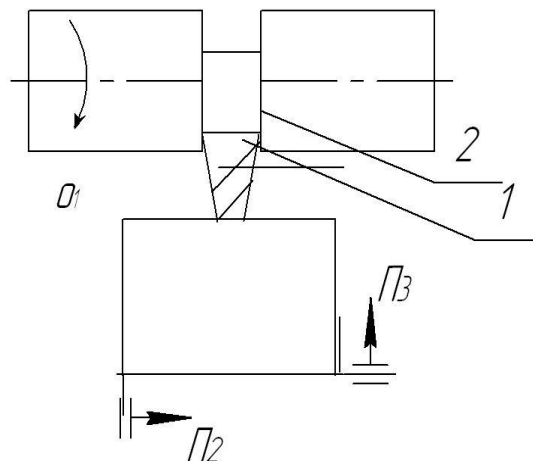
Інструмент – круглий фасонний різець.

1. Поперечне профільне точіння



1 –метод копіювання $\Phi=0$
 2 –метод сліду $\Phi=1$ $\Phi_v(O_1)$
 $\Phi_\Sigma=1: \Phi_v(O_1)+B_p(\Pi_3)+Y_{ст}(\Pi_2)$.

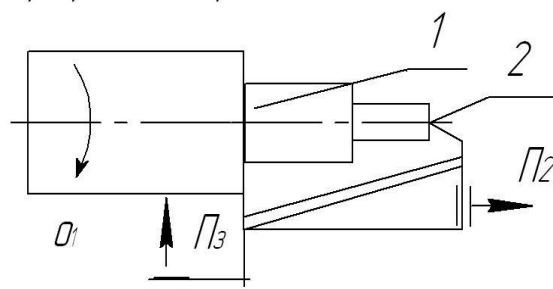
2. Поперечне прорізне точіння



Інструмент –канавочний різець

1 –метод копіювання $\Phi=0$
 2 –метод сліду $\Phi=1$ $\Phi_v(O_1)$
 $\Phi_\Sigma=1: \Phi_v(O_1)+B_p(\Pi_3)+Y_{ст}(\Pi_2)$.

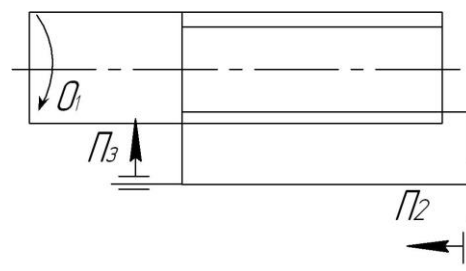
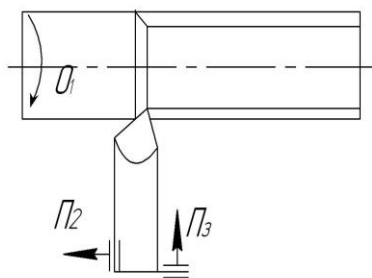
3. Профільне відрізне точіння



Інструмент –призматичний фасонний різець

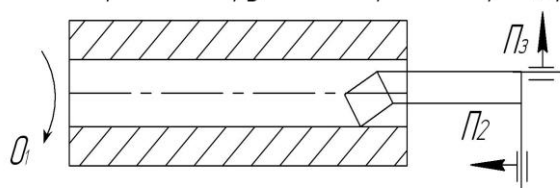
1- $\Phi_v(O_1)+B_p(\Pi_3)+Y_{ст}(\Pi_2)$.
 2- $\Phi_v(O_1); \Phi_s(\Pi_3)+Y_{ст}(\Pi_2)$.

Точіння гвинтових поверхонь



Обработка внутренних поверхностей

-токарными инструментами (разточні різці; різьбові різці).



метод копіювання

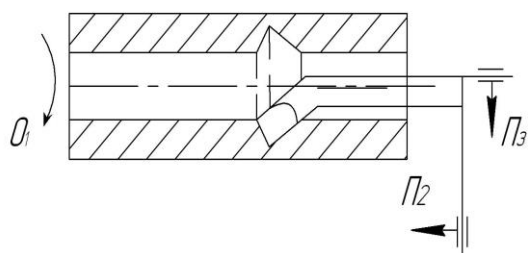
$$\Phi_{\Sigma}=1: \Phi_v(O_1\Pi_2)+Y_{ct}(\Pi_3).$$

Метод сліду – сліду

$$\Phi_{\Sigma}=2: \Phi_v(O_1); \Phi_s(\Pi_2)+Y_{ct}(\Pi_3).$$

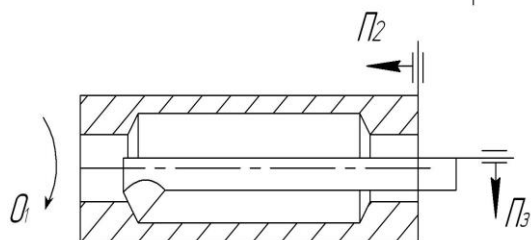
Метод копіювання – сліду.

$$\Phi_{\Sigma}=1: \Phi_v(O_1)+B_p(\Pi_3)+Y_{ct}(\Pi_2).$$



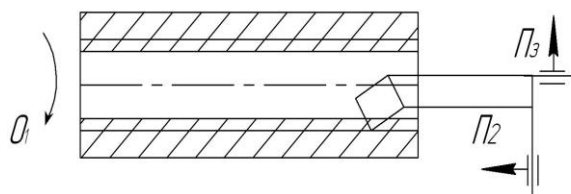
Метод сліду – сліду

$$\Phi_{\Sigma}=2: \Phi_v(O_1)+B_p(\Pi_2)+Y_{ct}(\Pi_3).$$



Метод сліду – сліду

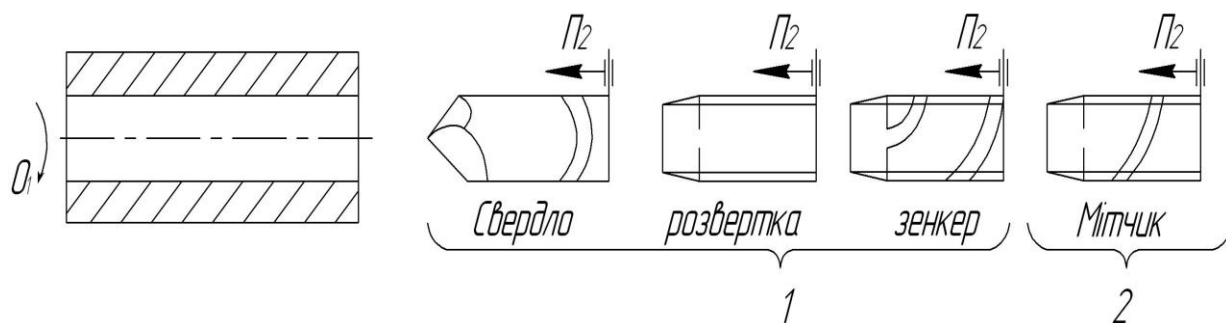
$$\Phi_{\Sigma}=2: \Phi_v(O_1); \Phi_s(\Pi_2)+B_p(\Pi_3).$$



Метод копіювання - сліду

$$\Phi_{\Sigma}=1: \Phi_v(O_1\Pi_2)+Y_{ct}(\Pi_3).$$

- ірструментом для обробки отворів(щсьовим інструментом).



1-метод сліду – сліду $\Phi_{\Sigma}=2: \Phi_v(O_1); \Phi_s(\Pi_2)$.

2-: $\Phi^*_v(O_1\Pi_2)$ або $\Phi_v(O_1)+B_p(\Pi_2)$.

*-за рахунок самозагвинчування інструменту.

2.4. Вибір основних технічних параметрів верстата

Висота центрів над станиною, мм	320
Найбільший діаметр виробу, встановлюємо над поворотним столом, мм	300
Найбільша довжина обточуємого виробу, мм	1200
Найбільша довжина обточквання, мм	900
Максимальний радіус розточуємої сфери, мм	200
Мінімальний радіус ротокуємої сфери, мм	25
Максимальний радіус обточуваної сфери, мм	150
Діаметр отвору в шпинделі, мм	52
Границі чисел обертів шпинделя, об/хв.	12,5..1600
Границі поздовжніх подач супорта, мм/об.шп.	0,05..2,8
Границі поперечних подач, мм/об.шп.	0,02..1,28
Границя колових подач на радіусі сфери 100мм	0,01..0,62
Границі крокові нарізаємих різей:	
метричних мм	0,5..112
дюймових, кількість ниток на 1"	56..0,25

Швидкість швидкого переміщення супорта:

Поздовжнього ходу, м/хв. 3,8

Поперечного ходу, м/хв 1,7

Кількість обертів поворотного стола при швидкому обертані, об/хв. 1,35

Габарити верстата, мм:

довжина 3160

ширина 1190

висота 1575

Вага верстата, кг 3622

2.5. Оптимізація компоувальної схеми верстата.

2.5.1 Обґрунтування модулів верстата.

Враховуючи те, що базовий верстат прийнято токарно-гвинторізний мод. 16K20, то:

$$TM = \{O\hat{C}ZX\}$$

Тобто, це найбільший склад блоків компоновки необхідний для виконання формоутворюючих рухів. Для використання осьового інструменту в компоновку верстата можна ввести окремий вузол

$$MK = \{O\hat{C}ZXW\}$$

Так як потрібно спроектувати верстат для обробки деталі типу ”корпус підшипника”, то треба ввести у верстат додатковий вузол, який забезпечив на даному верстаті розточувати сферу. Таким вузлом є поворотна плита

$$MK = \{O\hat{C}ZXB\}$$

2.5.2. Побудова загальної матриці компоновки верстата.

Для даного модульного комплексу можна утворити $N=4!=24$ варіанта можливих компонок. Загальна матриця компоновки верстата має вигляд

A=	XZBO	XZOB	XOZB	OXBZ
	XBZO	XBOZ	XOBZ	OXBZ
	ZXBO	ZXOB	ZOXB	OZXB
	ZBXO	ZBOX	ZOBX	OZBX
	BXZO	BXOZ	BOXZ	OBXZ
	BZXO	BZOX	BOZX	OBZX

2.5.3 Формування умов відбору.

Для вибору оптимальної компоновки верстата, яка б задовольняла необхідні умови, що ставляться до проектуваного верстата, потрібно накреслити певні умови, які б дозволили відкинути певні компоновки за певними ознаками і отримати в результаті одну або декілька найдоцільніших компонок токарного верстату.

Такими умовами можуть бути:

1. Всі рухи надаються інструменту.

M1: Ø+Ø+Ø+OÖÖÖ

2. Поперечно рухомий блок є кінцевим блоком компоновки з боку інструменту.

M2: Ø+ ÖÖÖX+ ÖÖÖX+ OÖÖX

3. Блок, який має найбільше переміщення розміщений біля стаціонарного з боку інструмента

4. M3: $\emptyset + \bar{O}\bar{O}OZ + \bar{O}\bar{O}Z\bar{O} + OZ\bar{O}\bar{O}$

2.5.4 Математичний вибір можливих компонок верстата.

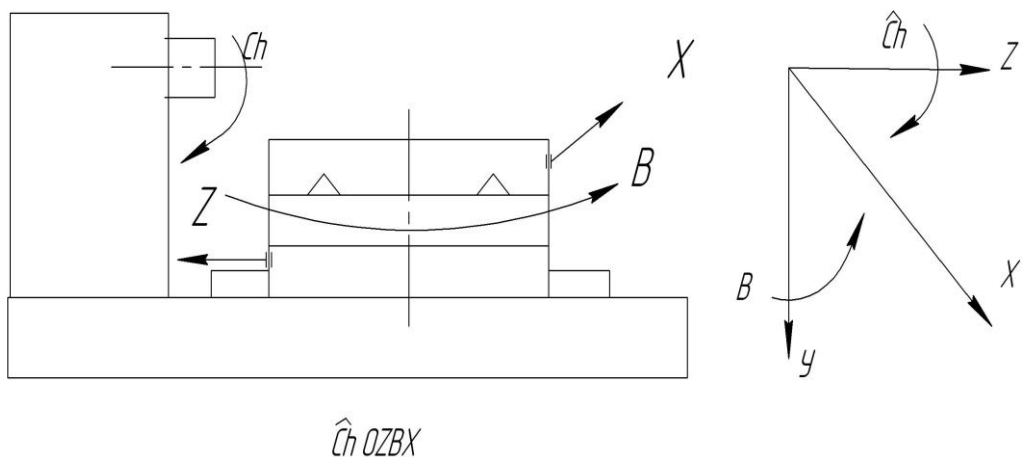
Маючи комплекс вказаних умов відбору компонок, знайдемо перетин множин компонок, яких розряд стаціонарного блоку який є постійним.

Умови відбору компонок:

$$\begin{array}{c} \emptyset + \emptyset + \emptyset + O\bar{O}\bar{O}\bar{O} \\ \emptyset + \bar{O}\bar{O}OX + \bar{O}O\bar{O}X + O\bar{O}\bar{O}X \\ \emptyset + \bar{O}\bar{O}OZ + \bar{O}\bar{O}Z\bar{O} + OZ\bar{O}\bar{O} \end{array}$$

Результат: $\emptyset + \emptyset + \emptyset + OZBX$

Відповідно компоновка до структурної формули OZBX.



При використанні осьового інструменту в компоновку верстата ведеться додатковий вузол завдання бабки (піноль задньої бабки).

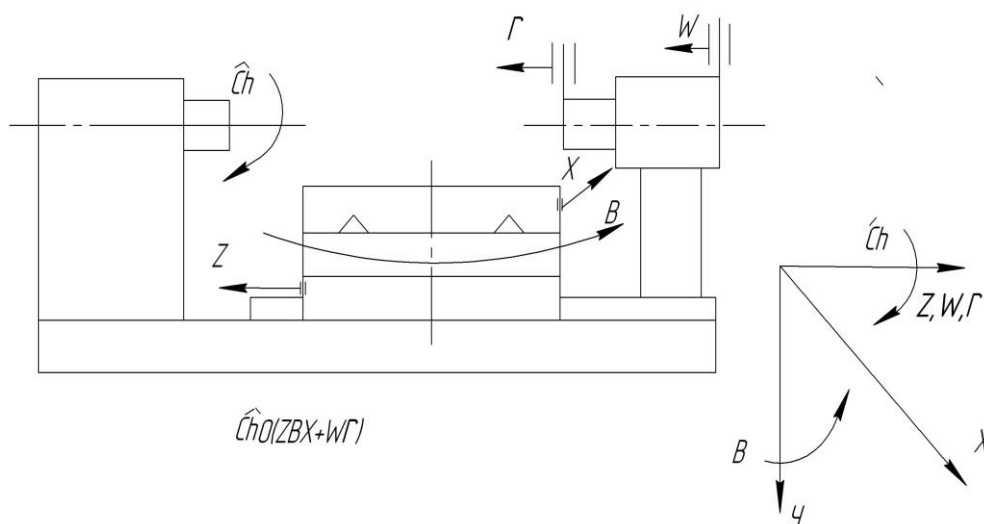


Рисунок 2.1 Компоновка верстата

2.6 Вибір та опис принципової структурно – кінематичної схеми верстата

На основі комплексу рухів по забезпеченню виробничого циклу на верстаті вибираємо основні рухи:

рух O_1 – обертання заготовки

рух Π_2 - поздовжнє переміщення супорта (інструмента)

рух Π_3 – поперечне переміщення супорта.

Для забезпечення цих рухів та кінематики верстата необхідні такі спеціальні механізми :

1) Ланка збільшення кроку :

розміщується в шпіндельній бабці і дозволяє збільшити крок в 2,8 і 32 рази.

Позначається $\langle \rangle^{uzk}$ відноситься до гвинторізного ланцюга при нарізанні різі і ланцюга подач при токарних операціях .Забезпечує велике збіль шення подачі супорта.

2) Механізм реверса :позначається $[\uparrow\downarrow]$ Р. Відноситься до гвинтового ланцюга або ланцюга подач . Забезпечує прямий і зворотній робочий хід супорта .

3) гітара змінних коліс $\frac{\alpha}{e} : \frac{c}{d}$; позначається $\diamond^{\text{шп}}$ – орган настройки на число π . Розміщена між виходом із шпіндельної бабки і входом в коробку подач. Забезпечує пропорційність числу π .

4) Зворотній механізм :позначається $\diamond^{\text{язв}}$. Розміщений в коробці подач . Забезпечує пропорційність цілому числу t (m) і зворотню пропорційність цілому числу $p(p)$,а також пропорційність одному дюйму для дюймових і підчевих різей .

5) множильний механізм :позначається $\diamond^{\text{Uм·м}}$. Розміщений в коробці подач після зворотнього механізму і забезпечує пропорційність руху 1 ,1/2 ,1/4 ,1/8.

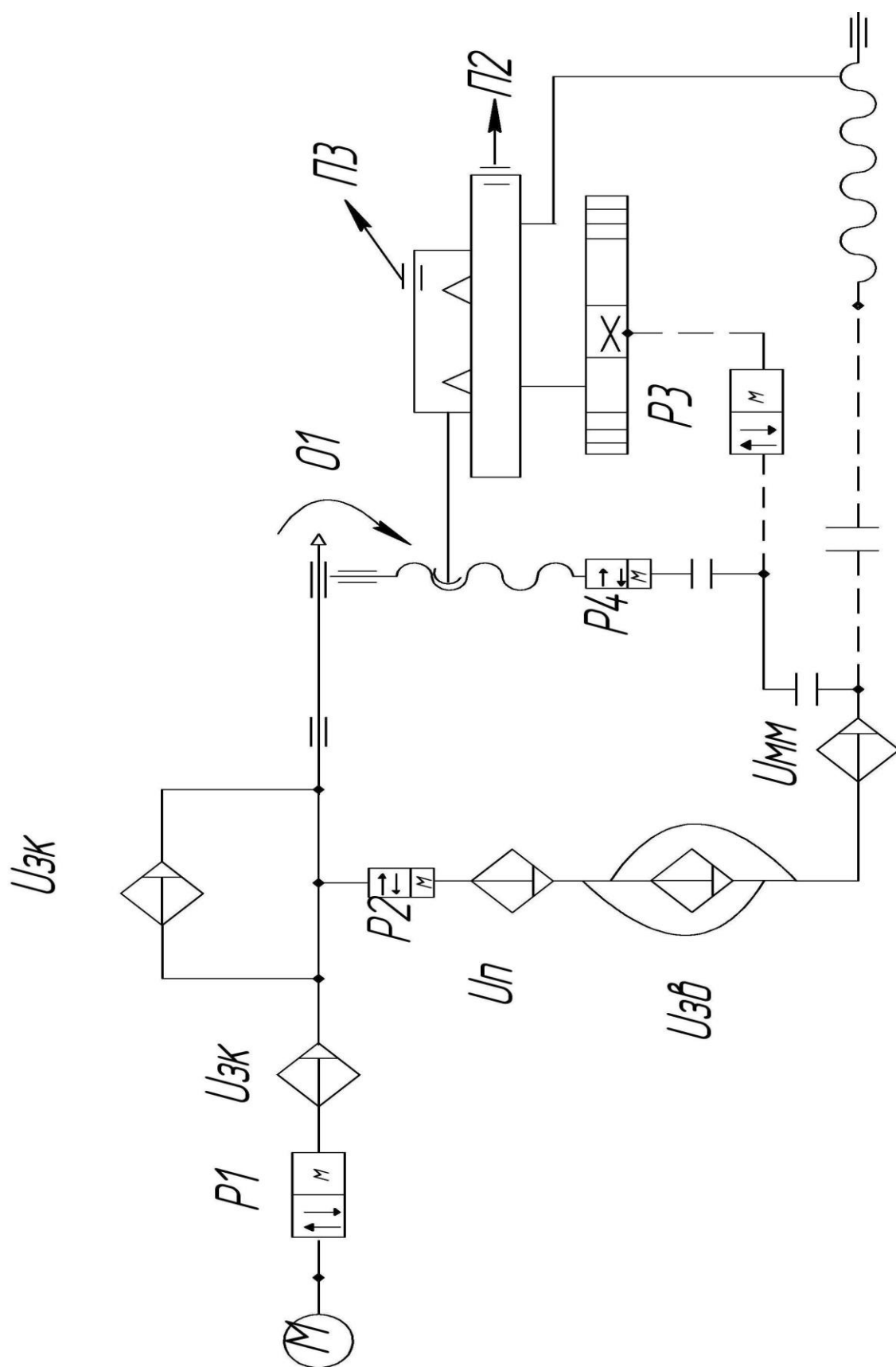


Рисунок 2.2 – Структурно-кінематична схема верстата

2.7 Технологічний розрахунок.

Вибір розрахункових параметрів оброблювальних деталей:

$D_{\max}=400\text{мм}$

$D_{\min}=20\text{мм}$

Вибір подачі при глибині різання :

$S=1\text{мм/об}$ при $t=3\text{мм}$

$S=0,246\text{мм/об}$ при $t=0,5\text{мм}$.

Глибина різання t :

$Ra=3.2\text{мкм}$; $t=0.5 \dots 2.0\text{мм}$

$Ra=0.8\text{мкм}$; $t=0.1 \dots 0.4\text{мм}$.

Для чистового точіння подачі $Ra=2,5$ мкм, радіус при вершині різця $r=1.2\text{мкм}$; $S=0,246\text{мкм}$. Швидкість різання v , м/хв при зовнішньому, поздовжньому і поперечному точінні і розточуванні розраховуємо по емпіричній формулі:

$$v = \frac{C_v}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} \cdot K_v,$$

де T - середнє значення стійкості інструмента , $T=30 \dots 60\text{хв}$ при одноінструментальній обробці.

C_v, m, x, y – коефіцієнти; при точінні інструментом з твердосплавною пластиною. Т15К6 при. $\sigma_B=750\text{МПа}$

$C_v=420$; $x=0,15$; $y=0,20$; $m=0,20$.

K_v -загальний поправочний коефіцієнт на швидкість .

$K_v=K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{uv}$.

K_{mv} – коефіцієнт, що враховує і відповідає за вплив фізико-механічних властивостей, для сталі при $\sigma_b=750\text{МПа}$.

$$K_{mv} = K_r \left(\frac{750}{\sigma_b} \right)^{n_v} = 1 \left(\frac{750}{750} \right)^1 = 1$$

$K_r=1; n_v=1$.

K_{uv} – коефіцієнти, що відповідає за вплив інструментального матеріалу на швидкість різання $K_{uv}=1$ (для сталі).

Отже $K_v = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{uv} = 1 \cdot 0,8 \cdot 1 = 0,8$.

Швидкість різання для чорнового точіння сталі 45 ($\sigma_b=750\text{МПа}$) інструментом (Т15К6).

$$g = \frac{C_v}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} \cdot K_v$$

$$g = \frac{340}{600^{0,20} \cdot 3^{0,15} \cdot 1,2^{0,2}} \cdot 0,8 = 93,6 (\text{м} / \text{хв})$$

Визначаємо силу різання при зовнішньому поздовжньому і точінні і розточуванні сили різання P_z , P_x , P_y по формулі:

$$P_{z,y,x} = 10 C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot g^n \cdot K_p.$$

При зовнішньому поздовжньому точінні сталі ($\sigma_b=750\text{МПа}$) для чорнової обробки:

$$P_z = 10 \cdot 300 \cdot 3^{1.0} \cdot 1.2^{0.75} \cdot 93.6^{-0.3} \cdot 0.93 = 2458.83(H);$$

$$P_y = 10 \cdot 243 \cdot 3^{0.9} \cdot 1.2^{0.6} \cdot 93.6^{-0.4} \cdot 0.82 = 1010.03(H);$$

$$P_x = 10 \cdot 339 \cdot 3^{1.0} \cdot 1.2^{0.5} \cdot 93.6^{-0.4} \cdot 1 = 1813.01(H);$$

$$K = K_{mp} \cdot K_{\varphi p} \cdot K_{\gamma p} \cdot K_{\lambda p} \cdot K_{\tau p}.$$

для сталі ($\sigma_B=750\text{МПа}$).

$$K_{pz} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.93 = 0.93.$$

$$K_{py} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.82 = 0.82.$$

$$K_{px} = 1.0 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1.0 = 1.0.$$

Аналогічно розраховуємо параметри для решти режимів різання. Значення зводимо в таблицю.

Таблиця 2.1 Розрахунок режимів різання

№ п/п	Вид обробки (матеріал)	ϑ , м/хв	P_z , Н	P_y , Н	P_x , Н
1	2	3	4	5	6
1	Чорнове точіння(сталь)	93,6	2458	1010	1813
2	Чистове точіння (сталь)	76,2	211	75	91
3	Відрізання (сталь)	33,6	1776	758	—
4	Фасонне точіння (сталь)	18,8	6195	—	—
5	Нарізання різи (сталь)	83,2	5129	—	—
6	Чорнове точіння (сірий чавун)	82,9	2240	1226	1022

7	Чистове точіння (СЧ)	92,3	149	83	131
8	Відрізання (СЧ)	37,9	2204	—	—
9	Нарізання кріпильної різі (СЧ)	29,0	1214	—	—
10	Чорнове точіння (мідні сплави)	40,6	1326	—	—

№ п/п	Вид обробки (матеріал)	ϑ , м/хв	P_z , Н	P_y , Н	P_x , Н
1	2	3	4	5	6
11	Чистове точіння(мідні сплави)	79,0	115	—	—
12	Чорнове точіння (алюмінієві сплави)	65,7	906	—	—
13	Чистове точіння (алюмінієві сплави)	91,2	65	—	—

З таблиці вибираємо граничні режими різання:

$$\vartheta_{\min} = 18.8 \text{ м / хв (фасонне точіння сталі);}$$

$$\vartheta_{\max} = 93.6 \text{ м / хв (чорнове точіння сталі).}$$

3 Дослідно-проектний розділ

3.1 Проектування та розрахунок шпиндельного вузла .

Точність $\Delta = \Delta g / 3$

де Δ -биття шпинделя ,мм

Δg -допуск на виготовлення деталі ,мм

$$\Delta g = 87 \text{ мкм} = 0,087 \text{ мм}$$

$$\Delta = \frac{0,87}{3} = 0,029 \text{ мм}$$

-жорсткість $J \geq F/y$.

де J -жорсткість на передньому кінці шпинделя ,н/мкм.

F -сила ,прикладена до кінця шпинделя ,мкм.

-вібростійкість ,власна частота шпинделя має бути не нижче 500-600Гц.

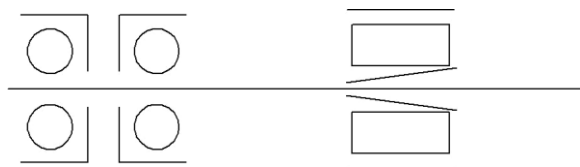
-тепlostійкість ,для верстатів нормального класу точності допустимий нагрів на зовнішньому кільці підшипника складає 70°C.

Компоновка ШВ

Параметри швидкості $n \cdot d$ -в залежності від цього параметру вибираємо компоновочно-вочну схему шпиндельного вузла .

$$\Pi \cdot d = 1000 \cdot 100 = 1 \cdot 10^5 \text{ мм} \cdot \text{хв}^{-1}$$

Для $\Pi \cdot d = 1 \cdot 10^5 \text{ мм} \cdot \text{хв}^{-1}$ задовільняє люба схема шпиндельного вузла .Так як верстат використовується для токарних робіт ,то приймаємо типову схему для токарних верстатів,а саме



$$d \cdot n \leq (1.6 \div 2) \cdot 10^5 \text{ мм} \cdot \text{хв}^{-1}$$

Рисунок 3.1 Схема ШВ .

Діаметр шпинделя:

$$d = \frac{(d \cdot n)_{\text{табл}}}{\Pi_{\text{max}}} = \frac{2 \cdot 10^5 \text{ мм} \cdot \text{хв}^{-1}}{1600 \cdot \text{хв}^{-1}} = 125 \text{ мм}.$$

Діаметр шпинделя d приймаємо $d=100$ мм/

Звідси основні конструктивні розміри шпинделя слідуючі :

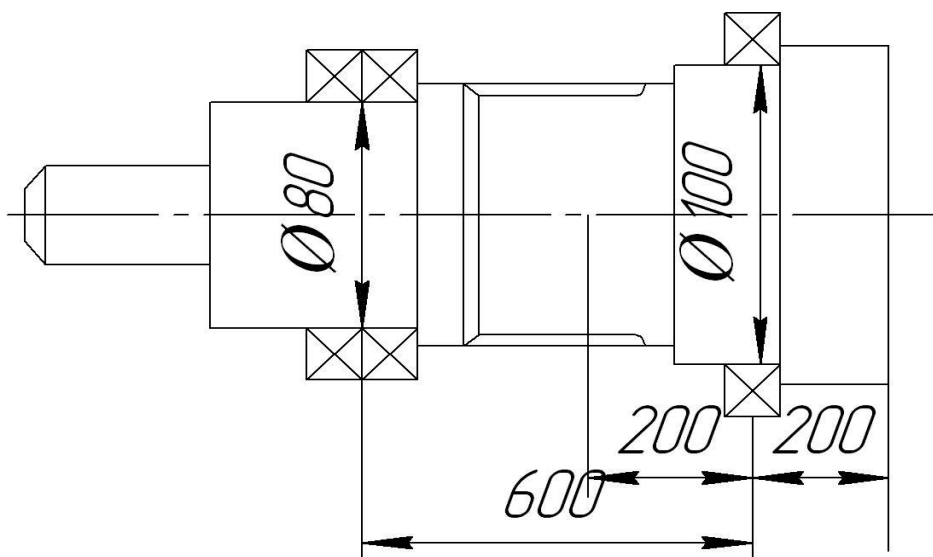
$$d_{\text{п}}=100 \text{ мм}$$

$$d_3=0,8 \cdot d_{\text{п}}=0,8 \cdot 100=80 \text{ мм}$$

$$L=6 \cdot d_{\text{п}}=6 \cdot 100=600 \text{ мм}$$

$$C=2 \cdot d_{\text{п}}=2 \cdot 100=200 \text{ мм}$$

$$b=2 \cdot d_{\text{п}}=2 \cdot 100=200 \text{ мм}$$



Риунок 3.2 - Компоновка ШВ.

Розрахунок елементів

Передача крутного моменту здійснюється від циліндричної шестерні через рухоме шліцеве з'єднання. Визначаємо внутрішній діаметр шліців шпинделя по пониженим допустимим напруженням кручення.

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T_{\text{ш}}}{\pi \cdot [\tau]_k}} \quad (4.2)$$

де $T_{ш}=T_{VI}-0.2 \cdot T_{VI}=1538.6-0.2 \cdot 1538.6=1230.8$ Н·м- крутний момент на шпінделі за мінусом момента який йде на привід механізму подачі

$[\tau]_K=25\text{Н/мм}^2$ [10] –допустиме напруження кручення.

$$d = \sqrt[3]{\frac{16T_{ш}}{3,14 \cdot 25}} = 63,05\text{мм.}$$

По таблиці 6.11 [10] підбираємо для шпинделя шліці з внутрішнім діаметром $d_{вн}=82\text{мм}$.

$$Z \times d \times D = 10 \times 82 \times 92\text{мм.}$$

Ширина зуба $b=12\text{мм}$; фаска на шліці $f=0.5\text{мм}$. Проведемо перевірковий розрахунок для шліцевої ділянки :

Матеріал для шпинделя приймаємо сталь 40ХН, термообробка покращення , границя витривалості $G_b=930\text{н/мм}$ -табл 3.3[10] .

Границя витривалості при симетричному циклі згину :

$$G_{-1}=0.43 \cdot G_b=0.43 \cdot 930=399.9\text{Н/мм}^2$$

Границя витривалості при симетричному циклі дотичних напружень :

$$T_{\tau_{-1}}=0.58 \cdot G_{-1}=0.58 \cdot 399.9=2,31\text{Н/мм}^2.$$

Момент опору січення шліцевої ділянки шпинделя рівний :

$$W_k = \frac{\pi d^4 + b(D-d)(D-d)^2 \cdot Z}{16 \cdot D}$$

$$W_k = \frac{3.14 \cdot 82^4 + 12(92-82) \cdot 98 + 82)^2 \cdot 10}{16 \cdot 92} = 24.7 \cdot 10^3 \text{мм}^3.$$

Амплітуда і середнє значення циклу дотичних напружень :

$$\tau_m = \tau_T = \frac{\tau_{\max}}{2} = \frac{T_{ш}}{2 \cdot W_K} = \frac{1538.6 \cdot 10^3}{2 \cdot 24.7 \cdot 10^3} = 31.14 \text{Н / мм}^2$$

Коефіцієнт запасу міцності :

$$n = \frac{\tau - 1}{\frac{K_{\tau}}{\varepsilon_{\tau}} \cdot \tau_v + \psi_{\tau} \cdot \tau_m};$$

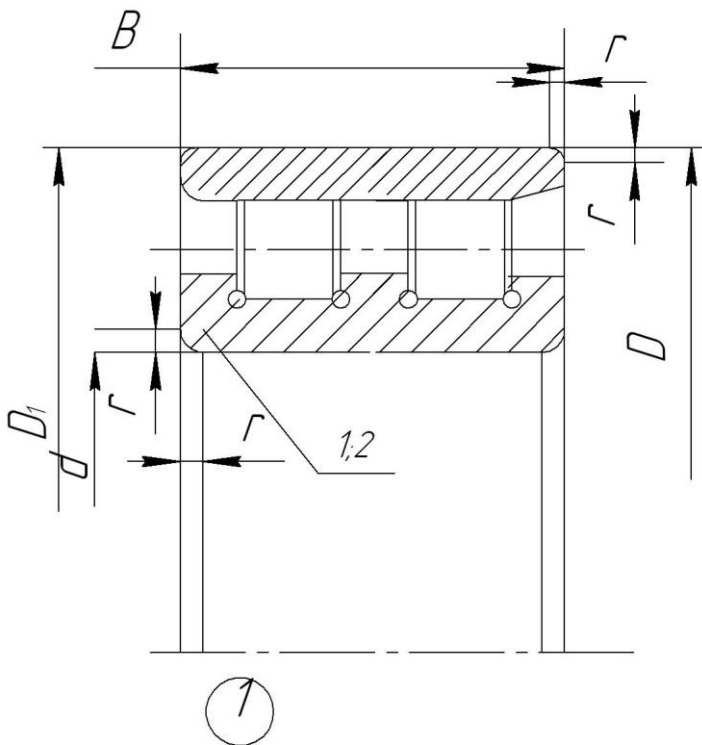
Де $K_t=1,65$ з табл 6.6[10] –ефективний коефіцієнт концентрації дотичних напружень на шліцевій ділянці шпинделя.

$\varepsilon_t=0,83$ з табл 6.8[10] –масштабний фактор для дотичних напружень
 $\psi_t=0,1[10,с.100]$ –коефіцієнт чутливості матеріалу.

$$\text{тоді } n = \frac{231}{\frac{1,65}{0,83} \cdot 31,14 + 0,1 \cdot 31,14} = 3,5$$

Характеристика елементів ШВ.

Опори кочення

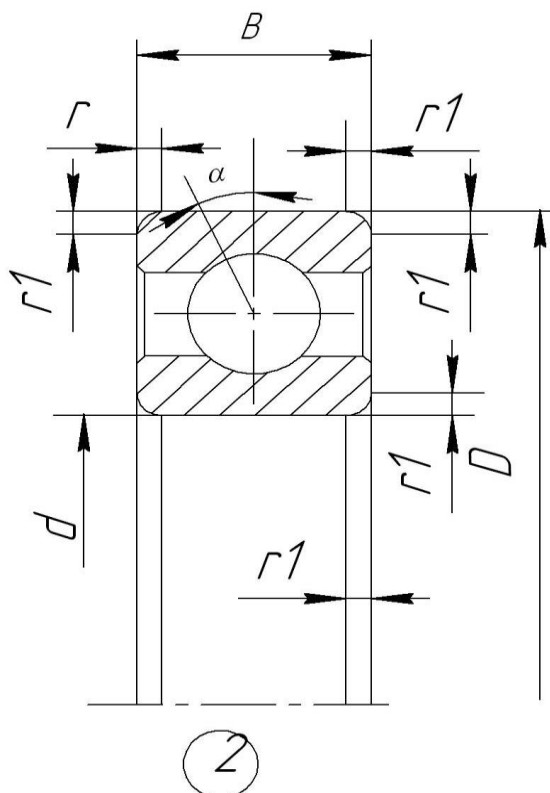


d=100 мм
D=150мм
B=37мм
r=2.2мм
D₁=137мм

Ролики D_w=11мм
l=11мм
Z=30
C=116000Н
C₀=128000Н

П_{гран}, об/хв. при змазці: пластичній -315 ; рідкій-400

Маса=2,19 кг



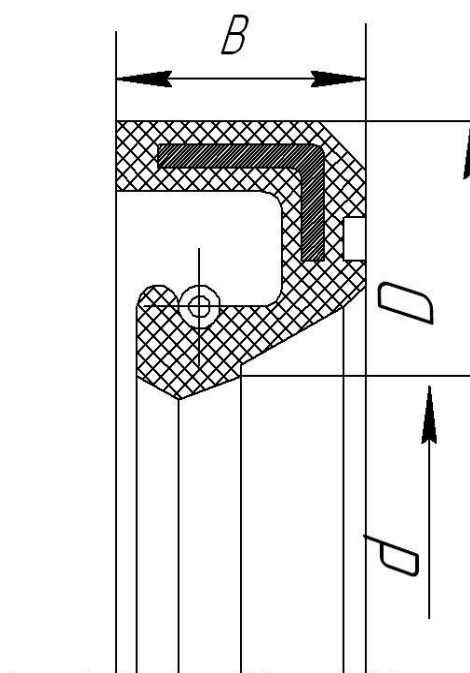
$d=80$ мм Кульки $D_w=19,05$ мм
 $D=140$ мм
 $B=26$ мм $Z=15$
 $r=3,0$ мм $C=68900$ Н
 $r=1,5$ мм $C_0=61200$ Н
 $\Pi_{\text{гран}}, \text{об/хв. при змазці:}$.
 пластичній -4000 ; рідкій-5000
 Маса=1,68 кг

1-роликовий підшипник радіальний двохрядний з короткими циліндричними роликами № 3182120.

2-шариковий підшипник радіально –упорний однорядний №46216.

Система ущільнень.

ар
пружи-



Контактне манжетне гумове
 армоване ущільнення з
 ною .

3.1.1 Розрахунок оптимальної міжосьової відстані між опорами вузла.

Конструктивна схема [2].

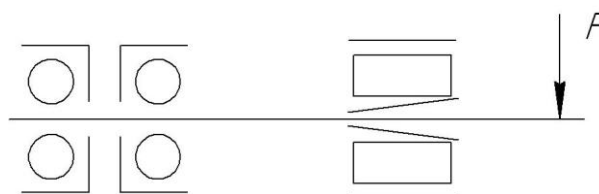


Рисунок 3.3 - Конструктивна схема.

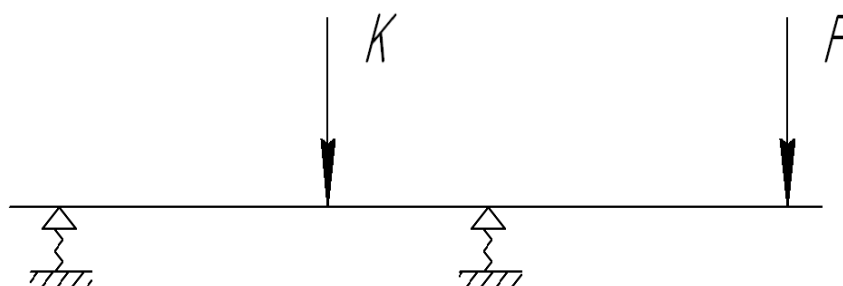


Рисунок 3.4 – Розрахункова схема.

Методика розрахунку.

Конструктивні параметри шпиндельного вузла в значній мірі впливають на його жорсткість. Рациональний вибір цих параметрів дозволяє дістати оптимальні жорсткі характеристики вузла. При наближених проектних розрахунках шпинделя його замінюють балкою на двох опорах з силою F , прикладеною на консолі, тобто на відстані «С» від середини передньої опори (рис 4.5).

Радіальну деформацію робочого кінця шпинделя можна представити у вигляді:

$$Y = Y_{\text{шп}} + Y_{\text{оп}} + Y_{\text{зс.}}$$

Де $Y_{\text{шп}}$ - переміщення, обумовлене згином тіла шпинделя;

$Y_{\text{оп}}$ - деформація кінця шпинделя ,обумовлена податливістю опор;

$Y_{\text{зс}}$ - зміщення ,викликане зсувом від дії поперечної сили.

Нехтуючи зсувними деформаціями $Y_{\text{зс}}$,які не перевищують (0,03...0,06) у , використовуємо відомі залежності з курсу «Опір матеріалів » ,отже ,звідси можна записати :

$$Y = \frac{F \cdot C^2}{3E} \left[\frac{C}{I_2} + \frac{L(1 - \xi_3)}{I_1} + F \left(K_1 \left[\frac{C(1 - \xi_3) + L}{L} \right]^2 + K_2 [1 - \xi_3] \frac{C^2}{L^2} \right) \right]$$

де E -модуль пружності матеріалу шпинделя ;

I_1 і I_2 -осьовий момент інерції січення шпинделя відповідно на робочому кінці між опорами ;

K_1, K_2 -податливість ,відповідно передньої і задньої опор шпинделя ;

ξ_3 –коефіцієнт,враховуючий наявність в передній опорі зацімлюючого моменту. Відповідно загальна податливість ШВ.

$$K = \frac{C^2}{3E} \left(\frac{C}{I_2} + \frac{L(1 - \xi_3)}{I_1} + K_1 \right) \left(\frac{C(1 - \xi_3) + L}{L} \right)^2 + K_2 (1 - \xi) \left(\frac{C}{L} \right)^2 ;$$

Після вибору діаметру D шийки шпинделя і попередньої ескізної проробки шпинделя оптимізують між опорну відстань L

Крива загальної податливості $K(L)$ має екстремум .Виходячи з критерію максимальної жорсткості (мінімальної податливості), рівняння диференціюють по L і прирівнюють до нуля.

$$\frac{dK}{dl} = 0.$$

В результаті дістанемо алгебраїчні рівняння третього порядку для визначення $L_{\text{опт}}$:

$$l^3 - \left(\frac{6EI_1 K_1}{C} \right) l + 6EI_1 (K_1 [1 - \xi_3] + K_2) = 0;$$

Рівняння розв'язують за допомогою формули або приближеним графічним методом. При призначенні міжопорної відстані враховують його вплив на точність обертання шпинделя, тому виходячи з критерію мінімального радіального биття переднього кінця шпинделя розміри міжопорної відстані оптимізують умовою:

$$l_{om} \geq 2.5c.$$

Приведена методика використовується при складанні алгоритму визначення оптимальної міжопорної відстані ШВ.

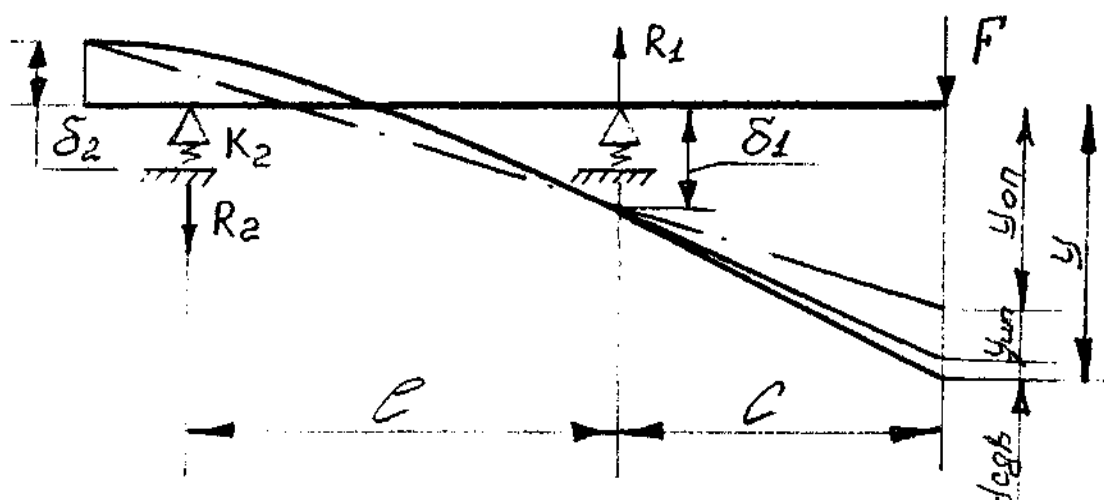


Рисунок 3.5 - Розрахункова схема прогину шпинделя

Результати розрахунку .

Прогин кінця шпинделя ,мм

$$U=0,011303$$

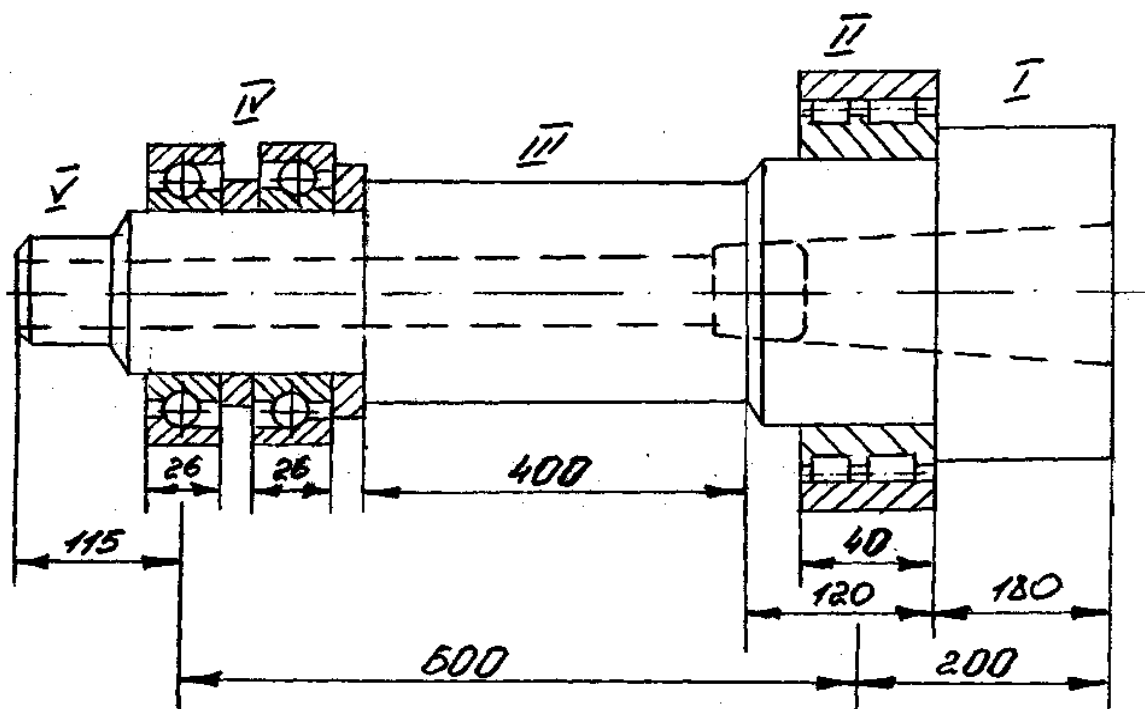
Зміщення кінця шпинделя ,мм

$$U_k=0,0365 < [U]=0,004$$

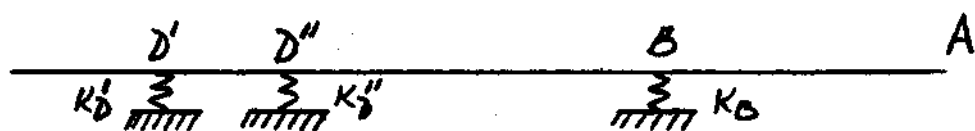
Значення « U_k » задовільняє граничним умовам .

3.1.2 Розрахунок жорсткості ШВ.

3.1.2.1 Розрахунок радіальної жорсткості ШВ.



Повна розрахункова схема.



Приведена розрахункова схема.

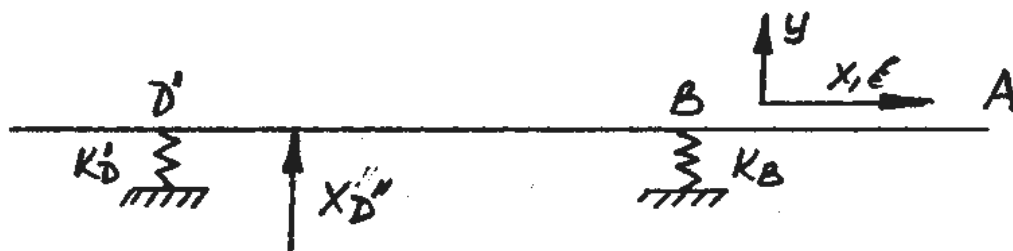


Рисунок 3.6 - Розрахункова схема радіальної жорсткості ШВ.

Наближений розрахунок радіальної жорсткості.

Розрахунок моментів інерції.

$$I_{np} = I = \frac{\sum_{i=1}^n I_i \cdot L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (4.9)$$

де i -та ділянка шпинделя,

I_i, L_i - момент інерції і довжина окремих ділянок на валу;

I ділянка на валу ;

$$I_I = \frac{\pi(d^4 - d_1^4)}{64} = \frac{3.14(10.35^4 - 5.9^4)}{64} = 503 \text{ см}^4.$$

$$d = 10.35 \text{ см}; d_1 = \frac{6.2 + 5.6}{2} = 5.9 \text{ см}; L_I = 18 \text{ см}.$$

II ділянка на валу ;

$$I_{II} = \frac{\pi(d^4 - d_1^4)}{64} = \frac{3.14(10^4 - 5.3^4)}{64} = 452 \text{ см}^4.$$

$$d = 10 \text{ см}; d_1 = \frac{5.6 + 5.0}{2} = 5.3 \text{ см}; L_{II} = 12 \text{ см}.$$

III ділянка на валу ;

$$I_{III} = \frac{\pi(d^4 - d_1^4)}{64} = \frac{3.14(9^4 - 5^4)}{64} = 170.3 \text{ см}^4.$$

$$d = 9 \text{ см}; d_1 = 5 \text{ см}; L_{III} = 40 \text{ см}.$$

IV ділянка на валу ;

$$I_{IV} = \frac{\pi(d^4 - d_1^4)}{64} = \frac{3.14(8^4 - 5^4)}{64} = 170.3 \text{ см}^4.$$

$$d = 8 \text{ см}; d_1 = 5 \text{ см}; L_{IV} = 18.4 \text{ см}.$$

V ділянка на валу ;

$$I_V = \frac{\pi(d^4 - d_1^4)}{64} = \frac{3.14(7.2^4 - 5^4)}{64} = 101.8 \text{ см}^4.$$

$$d = 7.2 \text{ см}; d_1 = 5 \text{ см}; L_V = 3 \text{ см}.$$

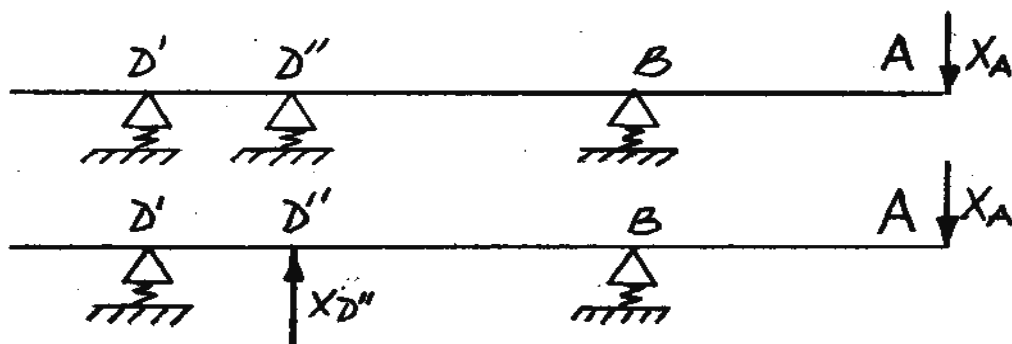
$$I_{np} = I = \frac{503 \cdot 18 + 452 \cdot 12 + 291.2 \cdot 40 + 170.3 \cdot 18.4 + 101.8 \cdot 3}{18 + 12 + 40 + 18.4 + 3} = 323.4 \text{ см}^4$$

Це все свідчить про те, що $I_{пр}$ неможливо використовувати для розрахунку

Математична модель розрахунку жорсткості ШВ.

Нехай для статично – невизначеної системи

$$\delta_A = \delta_{AA}^{D''} \cdot X_A$$



де $\delta_{AA}^{D''}$ - коефіцієнт впливу для статично-невизначеної системи.

Тоді для статично-визначеної системи

$$\delta_A = \alpha_{AA} \cdot X_A$$

$$\alpha_{AA} \cdot X_A + \alpha_{AD''} \cdot X_{D''} = \delta_{AA}^{D''} \cdot X_A$$

$$\delta_{AA}^{D''} = \alpha_{AA} + \frac{\alpha_{AD''} \cdot X_{D''}}{X_A};$$

З іншого боку канонічне рівняння для точки D'' має вигляд:

$$\sum_{i=1}^n \delta_i \gamma \cdot X \cdot \gamma + \sum_{P=P1}^{Pk} \delta_i \cdot P = -l_i \cdot X_i.$$

Записуємо рівняння з врахуванням двох сил X_A і $X_{D''}$.

$$\alpha_{D''A} \cdot X_A + \alpha_{D''D''} \cdot X_{D''} = -C_{D''} \cdot X_{D''}$$

Знайдемо відношення:

$$\frac{X_{D''}}{X_A} = \frac{\alpha_{AD''}}{L_{D''} + \alpha_{D''D''}};$$

Тоді підставивши в рівняння отримаємо:

$$\delta_{AA}^{D''} = \alpha_{AA} + \frac{\alpha_{AD''} \cdot \alpha_{D''A}}{L_{D''} + \alpha_{D''D''}};$$

Жорсткість шпинделя визначаємо в точці прикладання сили різання ,тобто на передньому кінці шпинделя .

Визначення коефіцієнтів впливу податливості.

Кожний коефіцієнт впливу складається з двох частин :переміщення пружної балки ,обчислених при умові нехтування деформаціями опор $\alpha'_{I\gamma}$ і переміщення балки ,обчисленої в представленні ,що балка ,а опори пружинні $\alpha''_{I\gamma}$

$$\alpha'_{I\gamma} = \alpha'_{I\gamma} \text{ і } \alpha''_{I\gamma}$$

Де $\alpha_{i\gamma}$ – переміщення в і-тій точці під дією одиночної сили прикладені в точці γ .

X- координата точки в якій рахується узагальнена деформація і.

ξ -координата точки в якій прикладається узагальнена сила γ .

Отже шукаємо наступні коефіцієнти впливу податливості :

$$\alpha_{AA} = \alpha'_{AA} + \alpha''_{AA}$$

$$\alpha_{AD}'' = \alpha'_{AD//} + \alpha''_{AD//}$$

$$\alpha_{D//A} = \alpha'_{A//D} + \alpha''_{D//A}$$

$$\alpha_{D//D}'' = \alpha_{D//D}'' + \alpha_{D//D}''$$

Розв'язуємо рівняння для знаходження коефіцієнта α_{AA} , для цього спочатку знаходимо складові коефіцієнти :

Розраховуємо коефіцієнт α'_{AA} .

Реакції опор :

$$R_{D'} = C/l; R_B = \frac{l+C}{C};$$

Моменти :

$$M_1 = a_1 = 180$$

$$M_2 = (\alpha_1 + \alpha_2) - \alpha_1 = \alpha_2 = 10$$

$$M_3 = R_{D'} \cdot l = \frac{C \cdot l}{l} = C = \alpha_1 + \alpha_2 = 180 + 10 = 190.$$

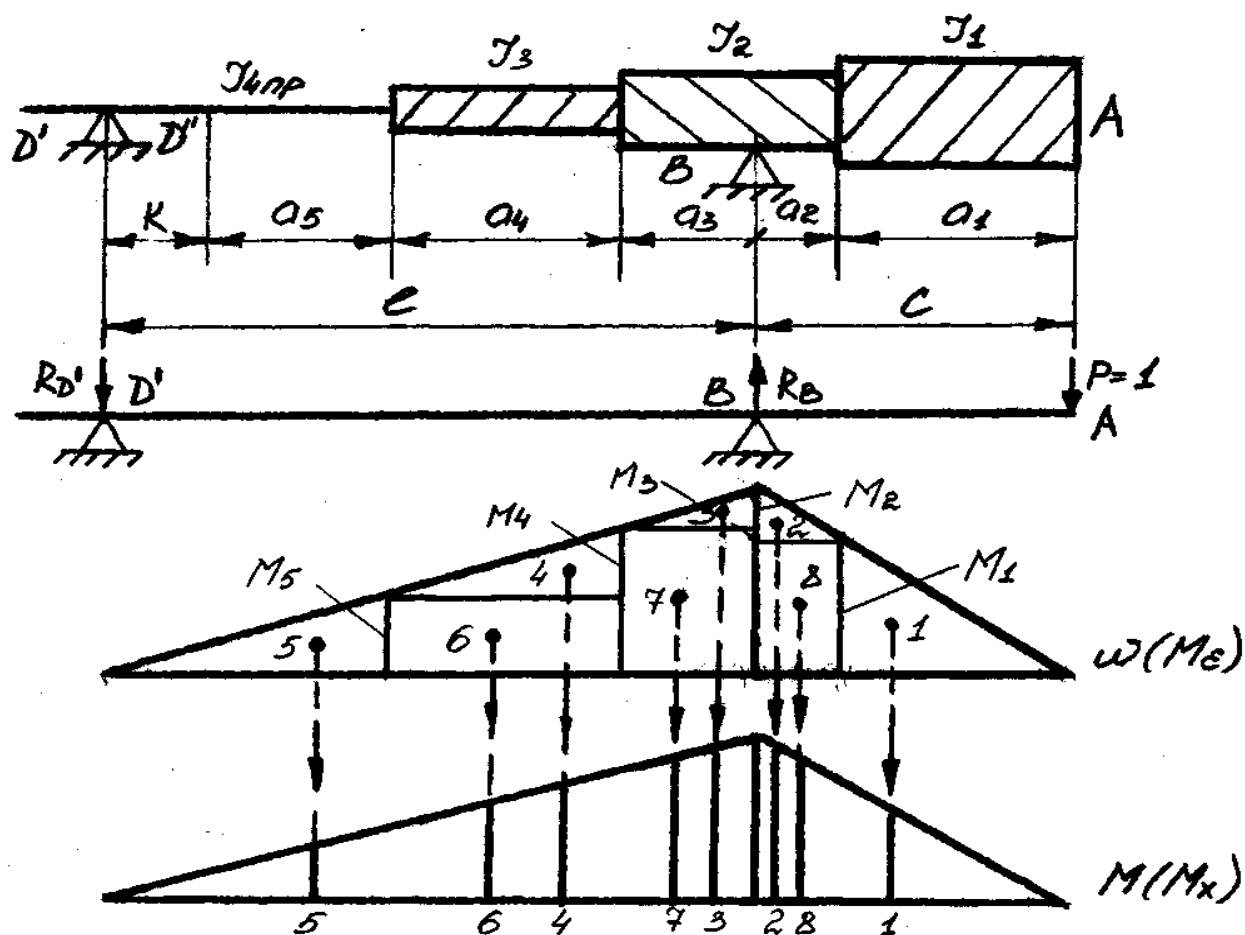


Рисунок 3.7 - Розрахункова схема для визначення коефіцієнта α_{AA} .

$R=40\text{мм}$; $a_1=180\text{мм}$; $a_2=10\text{мм}$; $a_3=110\text{мм}$; $a_4=400\text{мм}$; $a_5=50\text{мм}$;

$Cc=200\text{мм}$; $l=600\text{мм}$.

$$M_4 = R_{D'}(l - a_3) = C/l \cdot (l - a_3) = \frac{200}{600}(600 - 110)163.3$$

$$M_5 = R_{D'}(l - (a_3 + a_4)) = \frac{c}{l} \cdot (K + a_5) = \frac{200}{600}(5 + 40) = 30$$

Площа:

$$W_1 = 1/2 \cdot M_1 \cdot \alpha_1 = 1/2 \cdot 180 \cdot 180 = 16200 \text{ мм}^2$$

$$W_2 = 1/2 \cdot M_2 \cdot \alpha_2 = 1/2 \cdot 10 \cdot 10 = 50 \text{ мм}^2$$

$$W_3 = 1/2 \cdot M_3 \cdot \alpha_3 = 1/2 \cdot 190 \cdot 110 = 10450 \text{ мм}^2$$

$$W_4 = 1/2 \cdot M_4 \cdot \alpha_4 = 1/2 \cdot 163,3 \cdot 400 = 32660 \text{ мм}^2$$

$$W_5 = 1/2 \cdot M_5 \cdot (\alpha_5 + K) = 1/2 \cdot 30 \cdot (50 \cdot 40) = 1350 \text{ мм}^2$$

$$W_6 = M_5 \cdot \alpha_4 = 30 \cdot 400 = 12000 \text{ мм}^2$$

$$W_7 = (M_4 + M_5) \cdot \alpha_3 = (163,3 + 30) \cdot 110 = 21263 \text{ мм}^2$$

$$W_8 = M_1 \cdot \alpha_2 = 180 \cdot 10 = 1800 \text{ мм}^2.$$

Момент під координатою центра ваги :

$$M_1 = 2/3 \cdot M_1 = 2/3 \cdot 180 = 120$$

$$M_2 = 2/3 \cdot M_2 + M_1 = 2/3 \cdot 10 + 180 = 186,6$$

$$M_3 = 2/3 \cdot M_3 + M_4 + M_5 = 2/3 \cdot 190 + 163,3 + 30 = 320$$

$$M_4 = 2/3 \cdot M_4 + M_5 = 2/3 \cdot 136 + 30 = 138,8$$

$$M_5 = 2/3 \cdot M_5 = 2/3 \cdot 30 = 20$$

$$M_6 = 1/2 \cdot M_4 + M_5 = 1/2 \cdot 163,3 + 30 = 111,6$$

$$M_7 = 1/2 \cdot M_3 + M_4 + M_5 = 1/2 \cdot 190 + 163,3 + 30 = 288,3$$

$$M_8 = 1/2 \cdot M_2 + M_1 = 1/2 \cdot 10 + 180 = 15$$

Звідси :

$$\alpha'_{AA} = \sum_{i=1}^8 \frac{M_i \cdot W_i}{E \cdot I_i};$$

$$I_{4np} = \frac{I_4 \cdot l_4 + I_5 \cdot l_5}{l_4 + l_5} = \frac{170,3 \cdot 18,4 + 101,8 \cdot 3}{18,4 + 3} = 160,7 \text{ см}^4.$$

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Результати зводимо в таблицю 3.1

Таблиця 3.1

п/п	I	Значення	W	Значення	M	Значення	M · w / E · I
1	I ₁	503 · 10 ⁴	W ₁	16200	M ₁	120	1,93 · 10 ⁻⁶
2	I ₂	452 · 10 ⁴	W ₂	50	M ₂	186,6	1,02 · 10 ⁻⁸
3	I ₂	452 · 10 ⁴	W ₃	10450	M ₃	320	3,92 · 10 ⁻⁶

4	I_3	$291.2 \cdot 10^4$	W_4	32660	M_4	138.8	$7.78 \cdot 10^{-6}$
5	$I_{4\text{II}}$	$160.7 \cdot 10^4$	W_5	1350	M_5	20	$8.39 \cdot 10^{-8}$
6	I_3	$291.2 \cdot 10^4$	W_6	12000	M_6	111.6	$2.30 \cdot 10^{-6}$
7	I_2	$452 \cdot 10^4$	W_7	21263	M_7	288.3	$6.89 \cdot 10^{-6}$
8	I_2	$452 \cdot 10^4$	W_8	1800	M_8	185	$3.68 \cdot 10^{-8}$
Сума							$2,3 \cdot 10^{-5}$

$$\alpha'_{AA} = 2,3 \cdot 10^{-5} (\text{мм/Н})$$

Розраховуємо коефіцієнт $\alpha'_{AD''}$

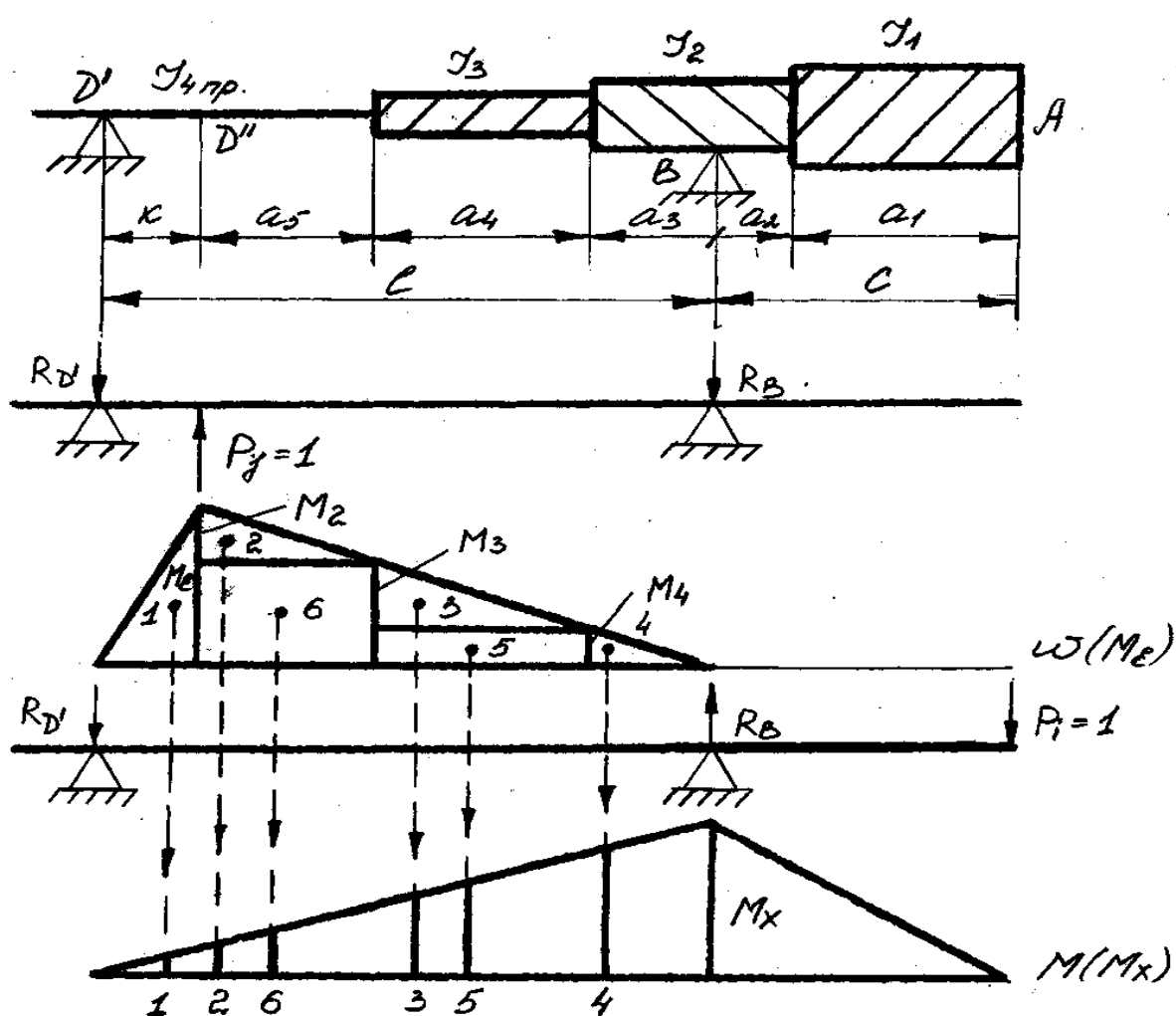


Рисунок 3.8 - Розрахункова схема для визначення коефіцієнта $\alpha'_{AD''}$

Визначаємо реакції R_B і $R_{D'}$ і моменти в точці прикладення сили $P \cdot \gamma = 1$ для M_{ξ} :

$$\sum M_{D'} = P \gamma \cdot K - R_B \cdot L = K - R_B \cdot L = 0$$

$$R_B = K/L = 40/600 = 6.6 \cdot 10^{-2} \text{ мм.}$$

$$\sum M_B = P_\gamma \cdot (a_5 + a_4 + a_3) R_{D'} \cdot L = (l - k) - R_{D'} \cdot l = 0$$

$$R_{D'} = \frac{l - K}{l} = \frac{600 - 40}{600} = 93.3 \cdot 10^{-2} \text{ мм.}$$

$$\text{Перевірка: } \sum y = R_{D'} - P \cdot \gamma + R_B = K/l - l/l + \frac{l - K}{l} = 0.$$

Звідси момент:

$$M_E = R_{D'} \cdot K = 93.3 \cdot 10^{-2} \cdot 40 = 37.3$$

$$M_3 = R_B (\alpha_3 + \alpha_4) = 6.6 \cdot 10^{-2} \cdot 510 = 33.66$$

$$M_4 = R_B \cdot \alpha_3 = 6.6 \cdot 10^{-2} \cdot 110 = 7.62$$

Визначаємо реакції R_B і $R_{D'}$ і моменти в точці прикладення сили $P_1 = 1$ епюри для M_x :

$$\sum M_{D'} R_B \cdot l - P_i(l + c) = 0$$

$$R_B = \frac{l + C}{l};$$

$$\sum M_B = P_i \cdot C - R_{D'} \cdot l = 0$$

$$R_{D'} = C/l.$$

$$\text{Перевірка: } \sum y = R_{B'} - R_{D'} P_i = \frac{l - K}{l} - C/l + l/l = 0.$$

$$\text{Звідси момент: } M_x = R_{D'} \cdot l = 0$$

Площа:

$$W_1 = 1/2 \cdot M_\xi \cdot K = 1/2 \cdot 37.3 \cdot 40 = 746 \text{ мм}$$

$$W_2 = 1/2 (M_\xi - M_4) \cdot \alpha_5 = 1/2 (M_\xi - R_B (\alpha_3 + \alpha_4) \cdot \alpha_5) = \\ = 1/2 (37.3 - 6.6 \cdot 10^{-2} \cdot 510) \cdot 50 = 91 \text{ мм}$$

$$W_3 = 1/2 (M_\xi - M_4) \cdot \alpha_4 = 1/2 (M_\xi - R_B \cdot \alpha_3) \cdot \alpha^4 = \\ = 1/2 (37.3 - 6.6 \cdot 10^{-2} \cdot 110) \cdot 400 = 6008 \text{ мм}$$

$$W_4 = 1/2 \cdot M_4 \cdot \alpha_3 = 1/2 \cdot R_B \cdot \alpha_3^2 = 1/2 \cdot 6.6 \cdot 10^{-2} \cdot 110^2 = 399.3 \text{ мм}$$

$$W_5 = M_4 \cdot \alpha_4 = 7.26 \cdot 400 = 2904 \text{ мм}$$

$$W_6 = M_3 \cdot \alpha_5 = 33.66 \cdot 50 = 1683 \text{ мм}$$

Момент під координатою центра ваги :

$$M_1 = \frac{M_x}{l}(\alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 + 1/3K) = C/l(\alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 + 1/3K) =$$

$$\frac{200}{600} \left(110 + 400 + 50 + \frac{1}{3} \cdot 40 \right) = 191.1 \text{ мм}^2$$

$$M_2 = \frac{M_x}{l}(\alpha_3 + \alpha_4 + 2/3\alpha_5) = 1/3(110 + 400 + 2/3 \cdot 50) = 181,1$$

$$M_3 = \frac{M_x}{l}(\alpha_3 + 2/3\alpha_4) = 1/3(110 + 2/3 \cdot 400) = 125,5$$

$$M_4 = \frac{M_x}{l} 2/3 \cdot \alpha_3 = 1/3 \cdot 2/3 \cdot 110 = 24,4$$

$$M_5 = \frac{M_x}{l}(\alpha_3 + 1/2\alpha_4) = 1/3(110 + 1/2 \cdot 400) = 103,3$$

$$M_6 = \frac{M_x}{l}(\alpha_3 + \alpha_4 + 1/2\alpha_5) = 1/3(110 + 400 + 1/2 \cdot 50) = 178,3$$

$$\text{Отже: } \alpha'_{AD}{}'' = \frac{1}{EI_2} \cdot M_4 \cdot W_4 + \frac{1}{EI_3} (M_3 \cdot W_3 + M_5 W_5) + \frac{1}{EI_{np}} (M_1 \cdot W_1 + M_2 W_2 + M_6 W_6)$$

$$\alpha'_{AD}{}'' = 3,09 \cdot 10^6 (\text{мм}/H).$$

Розраховуємо коефіцієнт $\alpha'_{D''A}$

Визначаємо реакції R_B і R'_D і момент M_x в точці прикладеної сили

$P_1=1$ для епюри M_x :

$$\sum M_{D'} = P_i \cdot K - R_B \cdot L = 0$$

$$R_B = K/L = 40/600 = 6.6 \cdot 10^{-2} \text{ мм.}$$

$$\sum M_B = P_i \cdot (l - k) - R_{D'} \cdot l = 0$$

$$R_{D'} = \frac{l - K}{l} = \frac{600 - 40}{600} = 93.3 \cdot 10^{-2} \text{ мм.}$$

$$\text{Звідси: } M_x = R_B(l - K) = 6.6 \cdot 10^{-2} (600 - 40) = 36.9$$

Визначаємо реакції R_B і R'_D і момент M_ξ в точці прикладеної сили

$P_1=1$ для епюри M_ξ :

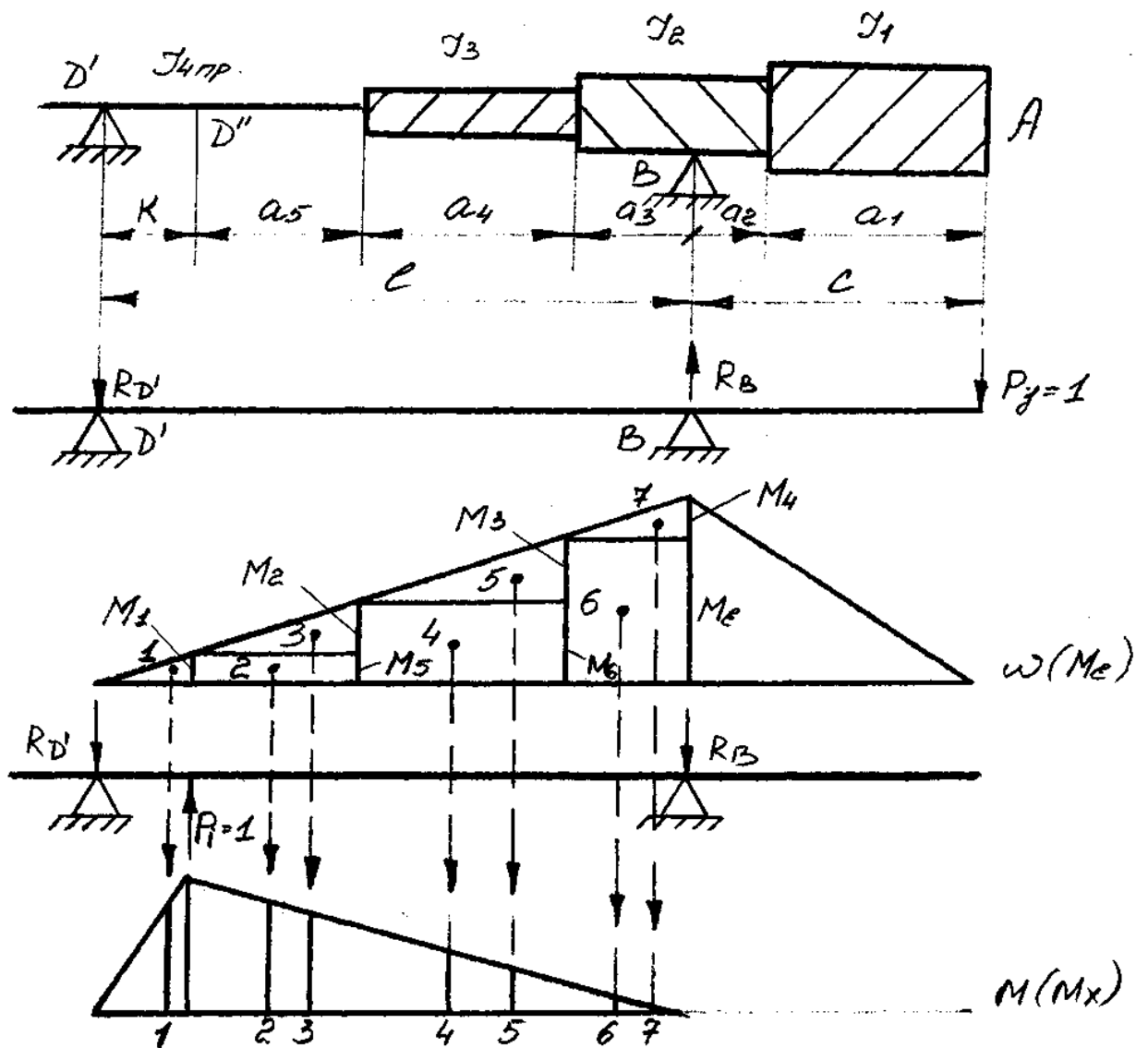


Рисунок 3.9 - Розрахункова схема для визначення коефіцієнта $\alpha'_{D''/A}$

Визначаємо реакції R_B і $R_{D'}$ і момент M_x в точці прикладеної сили $P_1=1$ для епюри M_x :

$$\sum M_{D'} = P_i \cdot K - R_B \cdot l = 0$$

$$R_B = K / l = 40 / 600 = 6.6 \cdot 10^{-2} \text{ мм}$$

$$\sum M_B = P_i (l - K) - R_{D'} \cdot l = 0$$

$$R_{D'} = \frac{l - K}{l} = \frac{600 - 40}{600} = 93.3 \cdot 10^{-2} \text{ мм}$$

$$\text{Звідси: } M_x = R_B (l - K) = 6.6 \cdot 10^{-2} (600 - 40) = 36.9$$

Визначаємо реакції R_B і $R_{D'}$ і момент M_ξ в точці прикладеної сили $P_1=1$ для епюри M_ξ :

$$\Sigma M_{D'} = R_B \cdot l - P \gamma (C + l) = 0; R_B = C/l;$$

$$\Sigma M_{B'} = R_D \cdot C - R_{D'} \cdot l = 0; R_D = \frac{C+l}{l};$$

$$\text{Перевірка: } \Sigma y = R_{B'} - R_{D'} P_\gamma = C/l \frac{C+l}{l} + l/l = 0.$$

$$M_\xi = C.$$

Звідси момент:

$$M_1 = R_{D'} \cdot K = 93.3 \cdot 10^{-2} \cdot 40 = 37.32$$

$$M_2 = R_{D'} \cdot (K + \alpha_5) = 93.3 \cdot 10^{-2} \cdot (40 + 50) - 37.32 = 46.65$$

$$M_3 = R_{D'} \cdot (K + \alpha_5 + \alpha_4) - M_2 = 93.3 \cdot 10^{-2} \cdot (40 + 50 + 400) - 46.65 = 410.52$$

$$M_4 = R_{D'} \cdot (K + \alpha_5 + \alpha_4 + \alpha_3) - M_3 = R_{D'} \cdot l - M_3 = 93.3 \cdot 10^{-2} \cdot 600 - 410.52 = 149.28$$

$$M_5 = R_{D'} \cdot (K + \alpha_5) = 93.3 \cdot 10^{-2} \cdot (40 + 50) = 83.97$$

$$M_6 = R_{D'} \cdot (K + \alpha_5 + \alpha_4) = 93.3 \cdot 10^{-2} \cdot (40 + 50 + 400) = 457.17$$

Площа :

$$W_1 = 1/2 \cdot K \cdot \frac{C \cdot K}{l} = 1/2 \cdot 40 \cdot \frac{200 \cdot 40}{600} = 266.6 \text{ мм}$$

$$W_2 = M_1 \cdot \alpha_5 = 50 \cdot 37.32 = 1866 \text{ мм}$$

$$W_3 = 1/2 \alpha_5 \cdot \frac{C - \alpha_5}{l} = 1/2 \cdot 50 \cdot \frac{200 - 50}{600} = 416.6 \text{ мм}$$

$$W_4 = M_5 \cdot \alpha_4 = 400 \cdot 83.97 = 33588 \text{ мм}$$

$$W_5 = 1/2 \alpha_4 \cdot \frac{C - \alpha_5}{l} = 1/2 \cdot 400 \cdot \frac{200 - 400}{600} = 26666.6 \text{ мм}$$

$$W_6 = M_6 \cdot \alpha_3 = 110 \cdot 457.17 = 5028.7 \text{ мм}$$

$$W_7 = 1/2 \alpha_3 \cdot \frac{C - \alpha_3}{l} = 1/2 \cdot 110 \cdot \frac{200 - 110}{600} = 2016.6 \text{ мм}$$

Момент під координатою центра ваги :

$$M_1 = 1/3 \cdot 36,9 = 12,3$$

$$M_2 = \frac{M_x}{(l-K)} \left(\alpha_3 + \alpha_4 + \frac{1}{2} \alpha_5 \right) = \frac{36,9}{(600-40)} \left(110 + 400 + \frac{1}{2} \cdot 50 \right) = 35,25$$

$$M_3 = \frac{M_x}{(l-K)} \left(\alpha_3 + \alpha_4 + \frac{2}{3} \alpha_5 \right) = \frac{36,9}{(600-40)} \left(110 + 400 + \frac{2}{3} \cdot 50 \right) = 35,8$$

$$M_4 = \frac{M_x}{(l-K)} \left(\alpha_3 + \frac{1}{2} \alpha_4 \right) = \frac{36,9}{(600-40)} \left(110 + \frac{1}{2} \cdot 400 \right) = 20,4$$

$$M_5 = \frac{M_x}{(l-K)} \left(\alpha_3 + \frac{2}{3} \alpha_4 \right) = \frac{36,9}{(600-40)} \left(110 + \frac{2}{3} \cdot 400 \right) = 24,82$$

$$M_6 = \frac{M_x}{(l-K)} \cdot \frac{1}{2} \cdot \alpha_3 = \frac{36,9}{(600-40)} \cdot \frac{1}{2} \cdot 110 = 3,62$$

$$M_7 = \frac{M_x}{(l-K)} \cdot \frac{2}{3} \cdot \alpha_3 = \frac{36,9}{(600-40)} \cdot \frac{2}{3} \cdot 110 = 4,83$$

Звідси : $\alpha'_{AD} = 2,6 \cdot 10^6 (\text{мм}/\text{H})$.

Розраховуємо коефіцієнт $\alpha'_{D''D''}$

Рисунок 3.4.12. Розрахункова схема для визначення коефіцієнта $\alpha'_{D''D''}$.

Визначаємо реакції R_B R_D і момент в точці прикладання сили $P=1$

$$\sum M_D = P \cdot K - R_B \cdot l = 0;$$

$$\sum M_B = P(l-K) - R_D \cdot l = 0;$$

$$R_B = \frac{K}{l} = \frac{40}{600} = 6,6 \cdot 10^{-2};$$

$$R_D = \frac{l-K}{l} = \frac{600-40}{600} = 93,3 \cdot 10^{-2}.$$

Звідси :

$$M_x = M_\xi = R_D \cdot K = 93,3 \cdot 10^{-2} \cdot 40 = 37,32 \text{ мм} \cdot \text{H};$$

$$M_1 = M_\xi - M_2 = R_D \cdot K - R_B(a_3 + a_4) = 37,32 - 6,6 \cdot 10^{-2} (110 + 400) = 3,66 \text{ H} \cdot \text{мм};$$

$$M_2 = R_B(a_3 + a_4) = 6,6 \cdot 10^{-2} (110 + 400) = 33,66 \text{ H} \cdot \text{мм};$$

$$M_3 = R_B \cdot a_3 = 6,6 \cdot 10^{-2} \cdot 110 = 7,26 \text{ H} \cdot \text{мм};$$

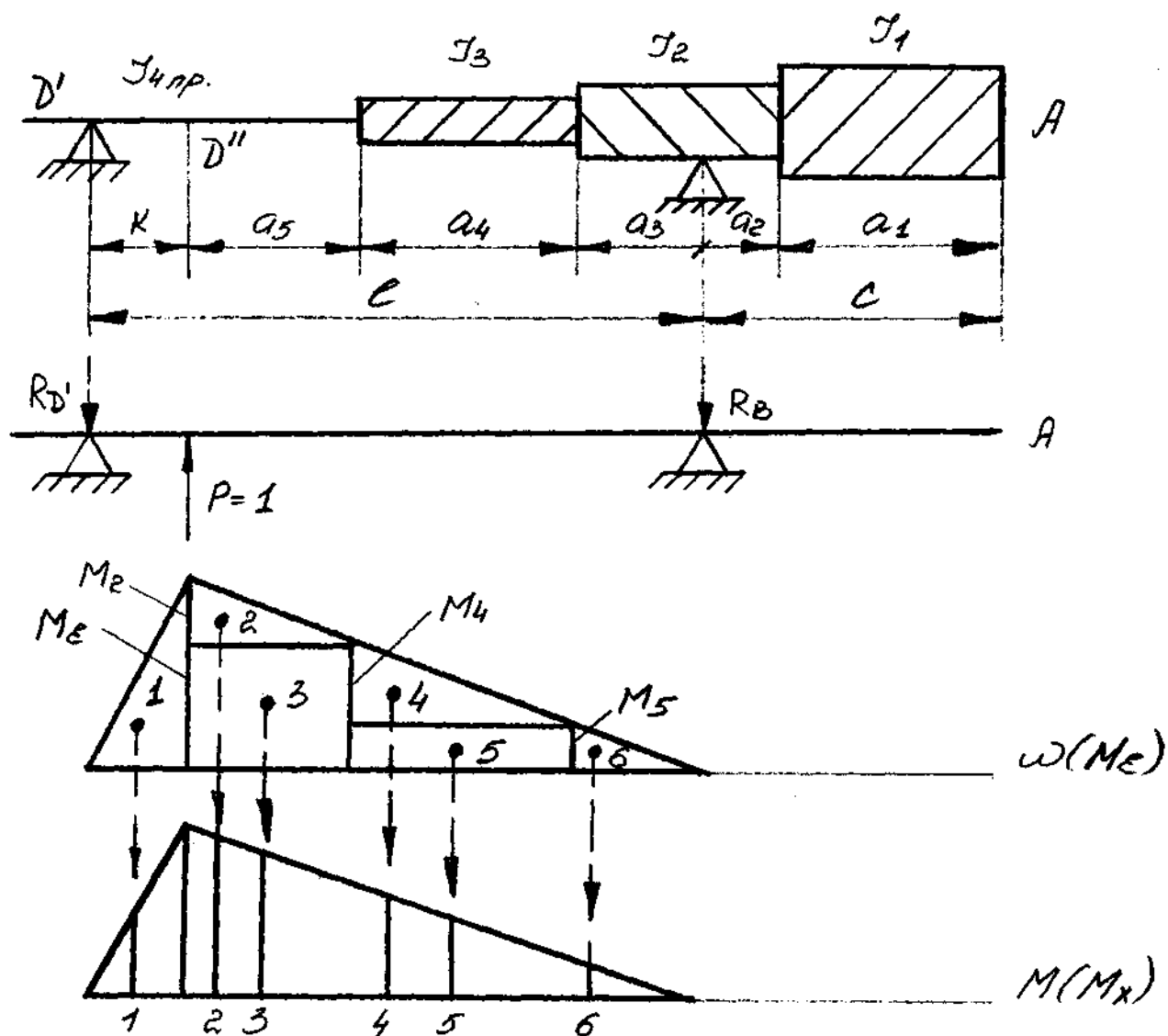


Рисунок 3.10 Розрахункова схема для визначення коефіцієнта $\alpha'_{D''D''}$

$$M_4 = M_2 - M_3 = R_B(a_3 + a_4) - R_B \cdot a_3 = 33,66 - 7,26 = 26,4 \text{ Н} \cdot \text{мм};$$

Площа :

$$W_1 = \frac{1}{2} \cdot M_\epsilon K = \frac{1}{2} \cdot 37,32 \cdot 40 = 746,4 \text{ мм}$$

$$W_2 = \frac{1}{2} \cdot M_1 \cdot a_5 = \frac{1}{2} \cdot 3,66 \cdot 50 = 91,5 \text{ мм};$$

$$W_3 = N_2 \cdot a_5 = 33,66 \cdot 50 = 1683 \text{ мм};$$

$$W_4 = \frac{1}{2} \cdot M_4 \cdot a_4 = \frac{1}{2} \cdot 26,4 \cdot 400 = 5280 \text{ мм};$$

$$W_5 = M_3 \cdot a_4 = 7,26 \cdot 400 = 2904 \text{ мм};$$

$$W_6 = \frac{1}{2} \cdot M_3 \cdot a_3 = \frac{1}{2} \cdot 7,26 \cdot 110 = 399,3 \text{ мм}.$$

Моменти під координатою центру ваги:

$$M_1 = \frac{2}{3} \cdot M_x = \frac{2}{3} \cdot 37,22 = 24,88;$$

$$M_2 = \frac{2}{3} M_1 + M_2 = \frac{2}{3} 3,66 + 33,66 = 36,1;$$

$$M_3 = \frac{1}{2} M_1 + M_2 = \frac{1}{2} 3,66 + 33,66 = 35,49;$$

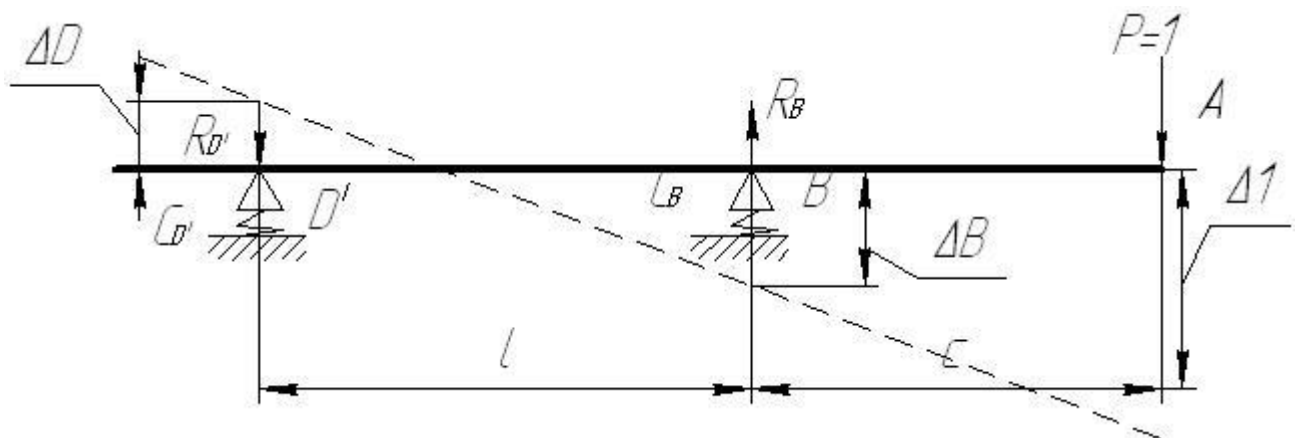
$$M_4 = \frac{2}{3} M_2 + M_3 = \frac{2}{3} 33,66 + 7,26 = 29,7;$$

$$M_5 = \frac{1}{2} M_2 + M_3 = \frac{1}{2} 33,66 + 7,26 = 24,09;$$

$$M_6 = \frac{2}{3} M_3 = \frac{2}{3} 7,26 = 4,84.$$

$$\text{Звідси: } \alpha'_{D''D''} = 6,14 \cdot 10^{-7} \text{ (мм/Н)}$$

Розраховуємо коефіцієнт α''_{AA} .



Шукаємо реакції опор від дії одиничної сили $P=1$:

$$R_B = \frac{l + \xi}{l}; \quad \Delta B = C_B \cdot \frac{l + \xi}{l};$$

$$R_{D'} = \frac{\xi}{l}; \quad \Delta D' = C_{D'} \cdot \frac{\xi}{l};$$

$$\frac{\Delta l + \Delta_{D'}}{\Delta B + \Delta_{D'}} = \frac{l + x}{l};$$

$$\alpha''_{AA} = \frac{l + x}{l} (\Delta B + \Delta D') - \Delta D' = \frac{(l + \xi)(l + x)}{l^2} C_B + \frac{x\xi}{l^2} \cdot C_{D'}.$$

Звідси підставимо значення l , x , ξ дістанемо:

$$l = a_3 + a_4 + a_5 + K = 600 \text{ мм};$$

$$c = x = \xi = 200 \text{ мм};$$

$$C_{D'} = \frac{1}{K_{D'}} = \frac{1}{12 \frac{daH}{\text{мм}}} = \frac{1}{280 \cdot 10^3 \text{ Н / мм}} 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ мм / Н}.$$

$$C_B = \frac{1}{K_B} = \frac{1}{28 \frac{daH}{\text{мм}}} = \frac{1}{280 \cdot 10^3 \text{ Н / мм}} 3,57 \cdot 10^{-6} \text{ мм / Н}.$$

$$\alpha''_{AA} = \frac{(600 + 200) \cdot (600 + 200)}{600^2} \cdot 3,57 \cdot 10^{-6};$$

$$\alpha''_{AA} = 7,26 \cdot 10^{-6} (\text{мм / Н}).$$

Розраховуємо коефіцієнт $\alpha''_{D'A}$

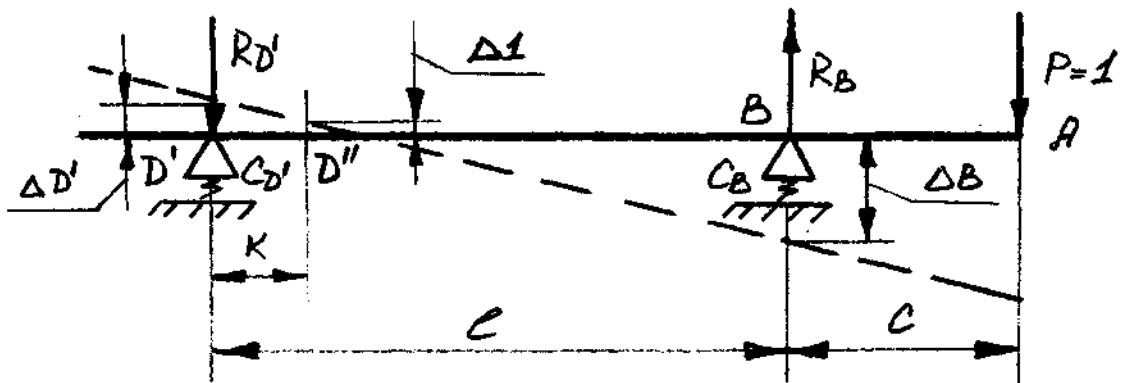


Рисунок 3.11 Розрахункова схема для визначення коефіцієнта $\alpha''_{D'A}$

Шукаємо реакції опор від дії динамічної сили $P=1$

$$\sum M_{D'} = R_B \cdot l - P(l + \xi) = 0; \quad R_B = \frac{l + \xi}{l};$$

$$\sum M_B = P \cdot \xi - R_{D'} \cdot l = 0; \quad R_{D'} = \frac{\xi}{l};$$

$$\Delta B = C_B \cdot \frac{l + \xi}{l}; \quad \Delta D' = C_{D'} \cdot \frac{\xi}{l};$$

Звідси :

$$\frac{\Delta l + \Delta_{D'}}{\Delta B + \Delta_{D'}} = \frac{l - x}{l};$$

$$\alpha''_{AA} = \frac{l - x}{l} (\Delta B + \Delta D') - \Delta D' = \frac{(l + \xi)(l - x)}{l^2} C_B + \frac{x \xi}{l^2} C_{D'}.$$

Звідси підставимо значення l, x, ξ дістанемо:

$$l = 600 \text{ мм}; \quad \xi = 200 \text{ мм}; \quad x = 200 \text{ мм}.$$

$$\alpha''_{D''A} = \frac{(600 + 200)(600 + 200)}{600^2} \cdot 3,57 \cdot 10^{-6} - \frac{200 \cdot 200}{600^2} \cdot 8,3 \cdot 10^{-6};$$

$$\alpha''_{D''A} = 7,26 \cdot 10^{-6} (\text{мм/Н}).$$

Розраховуємо коефіцієнт $\alpha''_{D''D''}$

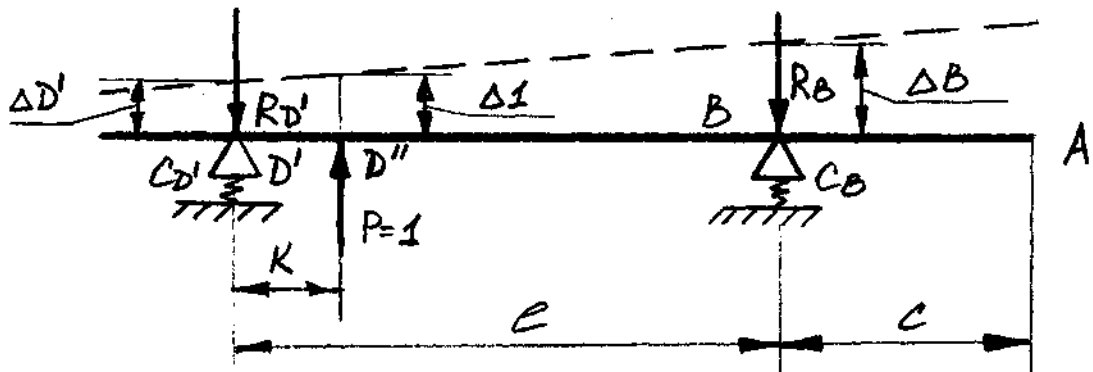


Рисунок 3.12 Розрахункова схема для визначення коефіцієнта $\alpha''_{D''D''}$

$$\sum M_{D'} = (l + \xi)P - R_B \cdot l = 0; \quad R_B = \frac{l - \xi}{l};$$

$$\sum M_B = P \cdot \xi - R_{D'} \cdot l = 0; \quad R_{D'} = \frac{\xi}{l};$$

$$\Delta B = C_B \cdot \frac{l - \xi}{l}; \quad \Delta D' = C_{D'} \cdot \frac{\xi}{l};$$

Звідси :

$$\frac{\Delta l + \Delta_{D'}}{\Delta B + \Delta_{D'}} = \frac{l - x}{l};$$

$$\alpha''_{AA} = \frac{l - x}{l}(\Delta B + \Delta_{D'}) - \Delta_{D'} = \frac{(l + \xi)(l - x)}{l^2} C_B - \frac{(l - x)\xi}{l^2} \cdot CD' + \frac{\xi}{l} \cdot CD'.$$

Звідси підставимо значення l і K дістанемо:

$$l = 600 \text{ мм}; K = 40 \text{ мм}$$

$$\alpha''_{D''D''} = \frac{(600 - 40)(600 - 40)}{600^2} \cdot 3,57 \cdot 10^{-6} - \frac{40^2}{600^2} \cdot 8,3 \cdot 10^{-6};$$

$$\alpha''_{D''D''} = 3,14 \cdot 10^{-6} (\text{мм/Н}).$$

Визначення жорсткості шпинделя

$$\delta_{AA} = \alpha_{AA} - \frac{\alpha_{AD''} \cdot \alpha_{D''A}}{\alpha_{D''D''} + C_{D'}};$$

$$\alpha_{AA} = \alpha'_{AA} + \alpha''_{AA} = 2,3 \cdot 10^{-5} + 7,62 \cdot 10^{-6} = 3,02 \cdot 10^{-5} (\text{мм/Н}).$$

$$\alpha_{AD''} = \alpha'_{AD''} + \alpha''_{AD''} = 3,09 \cdot 10^{-6} + 4,52 \cdot 10^{-6} = 7,34 \cdot 10^{-6} (\text{мм/Н}).$$

$$\alpha_{AD''} = \alpha'_{AD''} + \alpha''_{AD''} = 2,6 \cdot 10^{-6} + 2,25 \cdot 10^{-6} = 4,85 \cdot 10^{-6} (\text{мм/Н}).$$

$$\alpha_{D''D''} = \alpha'_{D''D''} + \alpha''_{D''D''} = 6,14 \cdot 10^{-7} + 3,14 \cdot 10^{-6} = 3,75 \cdot 10^{-6} (\text{мм/Н}).$$

$$\delta_{AA} = 2,72457 \cdot 10^{-5};$$

Звідси через податливість шпинделя визначаємо жорсткість шпинделя :

$$\gamma_{un} = 36,7 (\text{Н/мкм})$$

3.1.2.2 Розрахунок осьової жорсткості ШВ.

Розрахункова схема .

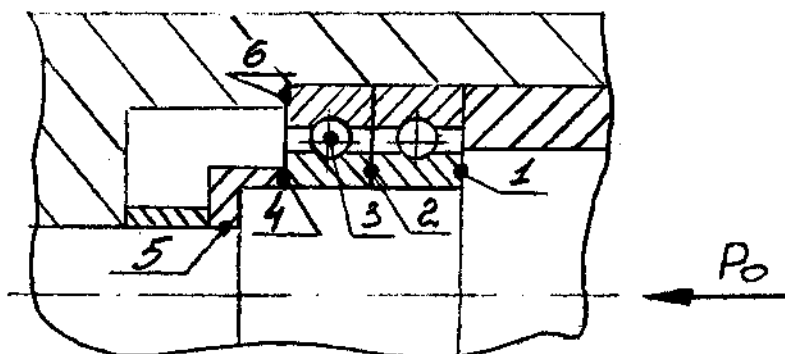


Рисунок 3.13- Конструктивна схема для визначення осьової жорсткості

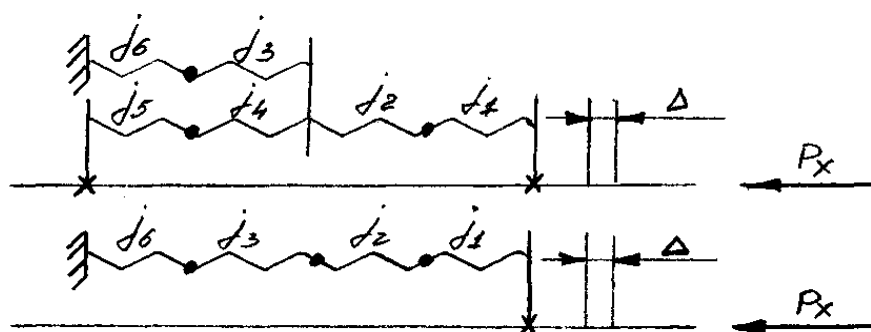
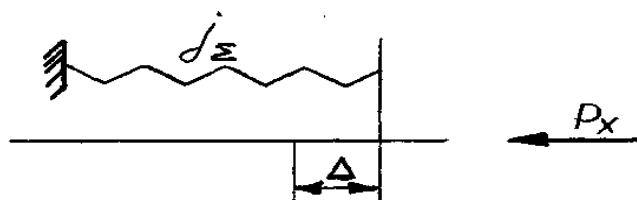


Рисунок 3.14 - Розрахункова схема для визначення осьової жорсткості

Приведена розрахункова схема .



Розрахунок осьової жорсткості.

Розрахунок контактних податливостей стиків

$C_{1,2,6}$ -нерухомі плоскі стики .

C_3 -підшипники .

$$C_\Sigma = C_1 + C_2 + C_3 + C_6.$$

Лінійна податливість плоских нерухомих стиків :

$$C_{л.л.л.} = 0,5 \cdot \frac{C\delta}{P^{0,5} \cdot F^{0,5}};$$

де $C_{л.л.л.}$ - лінійна податливість плоских нерухомих стиків :

$C\delta$ - коефіцієнт питомої контактної податливості ,що залежить від матеріалу і виводу механічної обробки .

$C\delta$ - Коефіцієнт питомої контактної податливості ,що залежить від матеріалу і виду механічної обробки .

$$C\delta = 1,9 \cdot 10^{-9} (м^2 \cdot H^{-1/2}) \text{ - для контакту сталь-сталь .}$$

F-площа контакту ,м².

P- осьова сила ,Н.

$$C_1 = 0,5 \cdot \frac{1,9 \cdot 10^{-3}}{1813^{0,5} \cdot 782,2} = 7,9 \cdot 10^{-7} (H^{-1/2});$$

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \pi \left(\frac{86^2}{4} - \frac{80^2}{4} \right) = 782,2 (мм^2).$$

$$C_2 = 0,5 \cdot \frac{1,9 \cdot 10^{-3}}{1813^{0,5} \cdot 7238,2} = 26 \cdot 10^{-7} (H^{-1/2});$$

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \pi \left(\frac{96^2}{4} - \frac{80^2}{4} \right) = 7238,2 (мм^2).$$

$$C_6 = 0,5 \cdot \frac{1,9 \cdot 10^{-3}}{1813^{0,5} \cdot 2525,82} = 4,4 \cdot 10^{-7} (H^{-1/2});$$

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \pi \left(\frac{140^2}{4} - \frac{128^2}{4} \right) = 25,25 (мм^2).$$

Підшипник кульковий .

$$C_{л.} = \frac{2}{3} \cdot \frac{K_{ш}}{P^{1/3}}; \quad K_{ш} = \frac{110 \cdot 10^{-6}}{\sqrt[3]{Z^2 \cdot d_k}};$$

Де -Z=10-кількість кульок.

$d_k=14(мм)$ -діаметер кульки .

$P=1813(Н)$ -осьова сила.

$$K_{ш} = \frac{110 \cdot 10^{-6}}{\sqrt[3]{10^2 \cdot 14}} 9.83 \cdot 10^{-6} (1/\text{мм}^{1/3}) ;$$

$$C_{л.} = \frac{2}{3} \cdot \frac{9.83 \cdot 10^{-6}}{18.13^{1/3}} = 3.8 \cdot 10^{-10} (H^{-1/2});$$

$$\text{Звідси : } C_{\Sigma} = 7.9 \cdot 10^{-7} + 2.6 \cdot 10^{-7} + 3.8 \cdot 10^{-10} + 4.4 \cdot 10^{-7}.$$

$$C_{\Sigma} = 1.49 \cdot 10^{-7} (\text{мм}/H).$$

$$\gamma_{ун.ос} = 1/C_{\Sigma} = 1/1.49 \cdot 10^{-7} = 0.6711409 \cdot 10^{-6} (\text{мм}/H)$$

$$\gamma_{ун.ос} = 67 (\text{кг}/\text{мкм})$$

$$\Delta = \frac{P_{ос}}{\gamma_{ун.ос}} = \frac{1813}{6.7} = 2.7 \cdot 10^{-3} (\text{мм}).$$

3.1.3 Динамічний розрахунок ШВ.

Розрахунок власних частот ШВ.

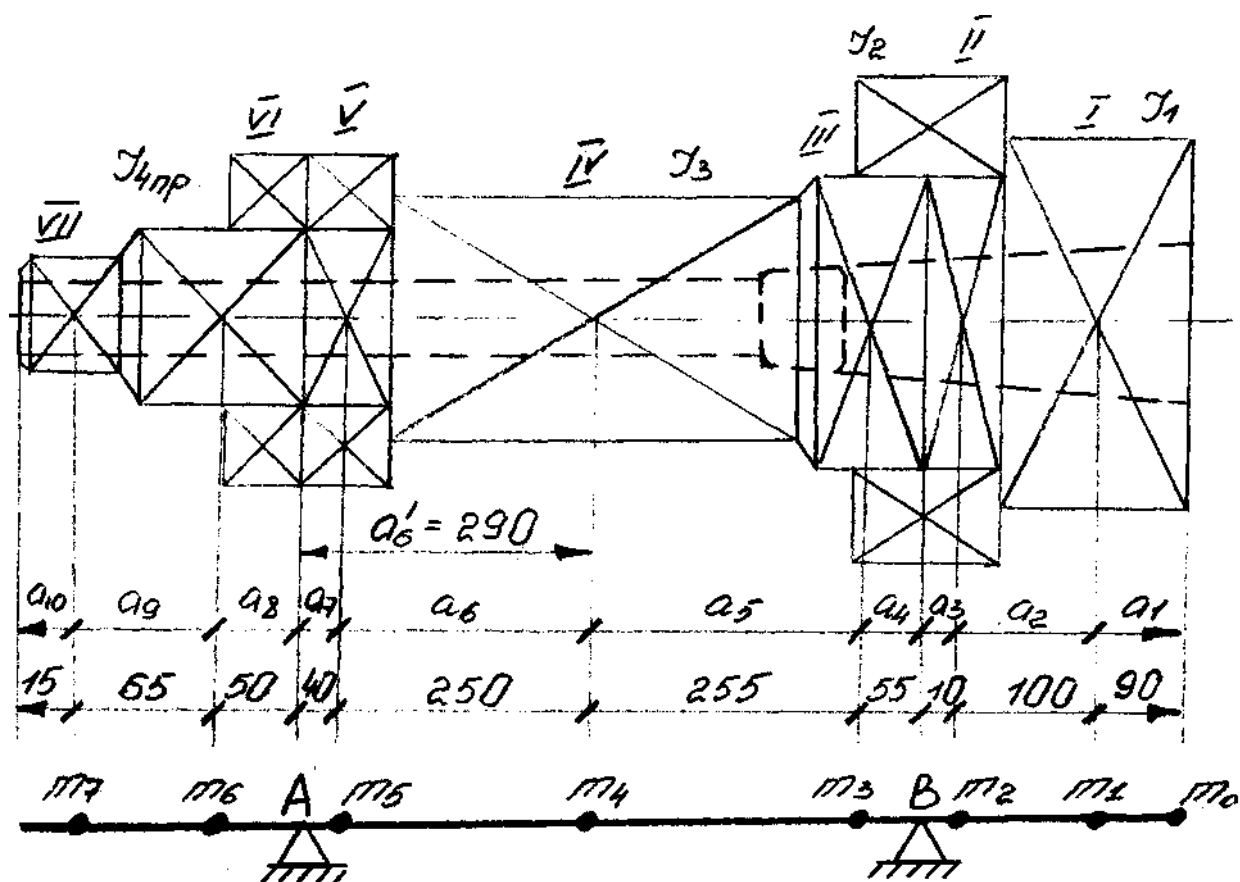


Рисунок 3.15 - Конструктивна та розрахункова схема для динамічного розрахунку ШВ.

Визначаємо масу кожної ділянки шпинделя :

$$m = \rho \cdot v \cdot 10^{-9}$$

Де $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ - густина сталі .

V-об'єм .мм³.

$$V = \frac{\pi d^2}{4 \cdot l};$$

$$V_I = \pi \left(\frac{d_1^2}{4} - \frac{d_2^2}{4} \right) \cdot l_I = \pi \left(\frac{103.5^2}{4} - \frac{59^2}{4} \right) \cdot 180 = 1.02 \cdot 10^6 (\text{мм})^3;$$

$$V_{II} = \pi \left(\frac{d_1^2}{4} - \frac{d_2^2}{4} \right) \cdot l_{II} = \pi \left(\frac{56^2}{4} - \frac{59^2}{4} \right) \cdot 10 = 1727 (\text{мм})^3;$$

$$V_{III} = \pi \left(\frac{d_1^2}{4} - \frac{d_2^2}{4} \right) \cdot l_{III} = \pi \left(\frac{54^2}{4} - \frac{50^2}{4} \right) \cdot 110 = 35921.6 (\text{мм})^3;$$

$$V_{IV} = \pi \left(\frac{d_1^2}{4} - \frac{d_2^2}{4} \right) \cdot l_{IV} = \pi \left(\frac{103.5^2}{4} - \frac{59^2}{4} \right) \cdot 400 = 1.75 \cdot 10^6 (\text{мм})^3;$$

$$V_V = \pi \left(\frac{d_1^2}{4} - \frac{d_2^2}{4} \right) \cdot l_V = \pi \left(\frac{80^2}{4} - \frac{50^2}{4} \right) \cdot 50 = 153075 (\text{мм})^3;$$

$$V_{VI} = \pi \left(\frac{d_1^2}{4} - \frac{d_2^2}{4} \right) \cdot l_{VI} = \pi \left(\frac{80^2}{4} - \frac{50^2}{4} \right) \cdot 100 = 306150 (\text{мм})^3;$$

$$V_{VII} = \pi \left(\frac{d_1^2}{4} - \frac{d_2^2}{4} \right) \cdot l_{VII} = \pi \left(\frac{72^2}{4} - \frac{50^2}{4} \right) \cdot 30 = 63208.2 (\text{мм})^3;$$

Отже $m_1 = 7.96$ (кг).

$m_4 = 13,71$ (кг).

$m_7 = 0,49$ (кг).

$m_2 = 0,01$ (кг).

$m_5 = 1,19$ (кг).

$m_3 = 0,28$ (кг).

$m_6 = 2,038$ (кг).

Визначаємо комбіновану перевірку масиву ,але для початку зводимо масу m_7 в масу m_6 Для цього розглянемо ділянку шпинделя.

При $I = \text{const.}$

$$m_{np}^I = m_6 = m_7 \cdot \mu.$$

де
$$\mu = \frac{\delta_{11}}{\delta_{22}}$$

$$b = \alpha_8 + \alpha_9 = 50 + 65 = 115 (\text{мм}).$$

Шукаємо σ_{11} :

Визначаємо реакції опор.

Звідси $R_A = b/l; R_B = \frac{b+l}{l};$

$$M = P \cdot b = b.$$

Використовуємо метод Верещагіна :

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{2} \cdot M \cdot l \cdot \frac{2}{3} \cdot M + \frac{1}{2} \cdot b \cdot M \cdot \frac{2}{3} \cdot M \right) = \frac{b^2(b+l)}{3EI};$$

Шукаємо σ_{22} :

Визначаємо реакції опор :

$$R_A = \frac{\alpha_8}{l}; R_B = \frac{\alpha_8 + l}{l};$$

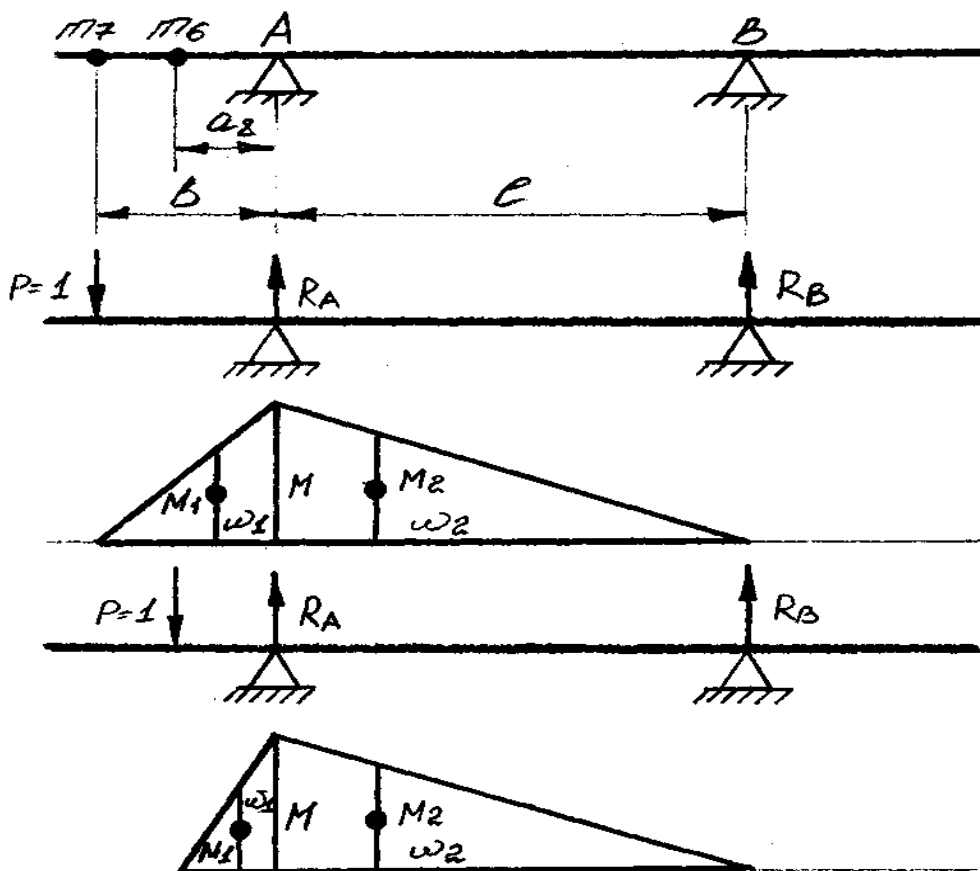


Рисунок 3.16 - Зведення маси m_7 в масу m_6 .

Звідси: $M = P \cdot a_8 = a_8$;

Використовуємо метод Верещагіна :

$$\delta_{22} = \frac{\alpha_8^2(\alpha_8 + l)}{3EI};$$

Звідси:
$$\mu \frac{\delta_{11}}{\delta_{22}} = \frac{b^2(b+l)}{3EI} \cdot \frac{3EI}{\alpha_8^2(\alpha_8 + l)} = \frac{b^2(b+l)}{\alpha_8^2(\alpha_8 + l)};$$

Отже:
$$m_{np}^I = m_6 + m_7 \cdot \frac{b^2(b+l)}{\alpha_8^2(\alpha_8 + l)};$$

$$m_{np}^I = 2.38 + 0.49 \cdot \frac{115^2(115 + 600)}{50^2(50 + 600)} = 5.23(\text{кг});$$

Зводимо масу m_4 в масу m_3 Для цього розглянемо ділянку шпинделя.

$$m_{np}^{II} = m_3 = m_4 \cdot \mu.$$

Де
$$\mu = \frac{\delta_{11}}{\delta_{22}}$$

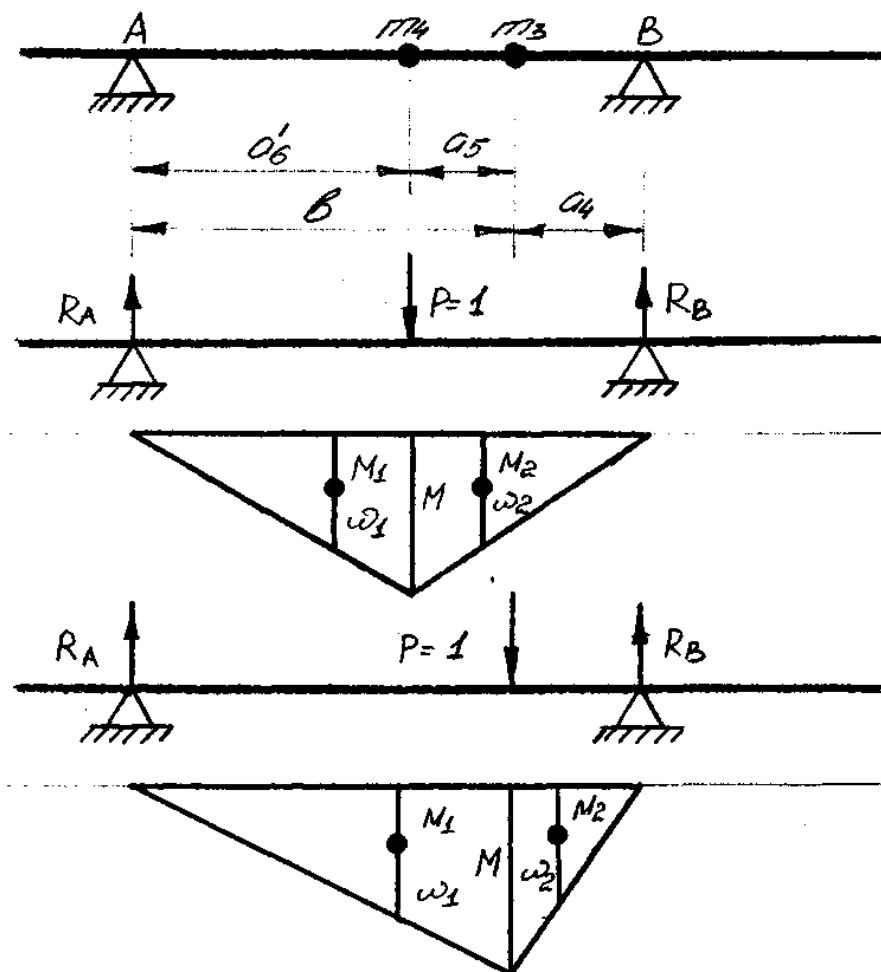


Рисунок 3.17 - Зведення маси m_4 в масу m_3 .

$$a'_6 = a_6 + a_7 = 250 + 400 = 290(\text{мм})$$

$$b = a'_6 + a_7 = 290 + 255 = 5,45(\text{мм})$$

Шукаємо σ_{11} :

Визначаємо реакції опор:

$$\sum M_A = P \cdot a'_6 - R_B \cdot (b + a_4) = 0; R_B = \frac{a'_6}{(b + a_4)};$$

$$\sum M_B = P(a_4 + a_5) - R_A \cdot (a + b) = 0; R_A = \frac{a_4 + a_5}{b + a_4};$$

Звідси:
$$M = R_A \cdot a'_6 = \left(\frac{a_4 + a_5}{b + a_4} \right) \cdot a'_6.$$

Використовуємо метод Верещагіна :

$$\delta \sum_{i=1}^n \frac{M_i \cdot \omega_i}{EI};$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{2} \cdot M \cdot \alpha'_6 \cdot M \cdot \frac{2}{3} \cdot M + \frac{1}{2} \cdot (a_5 + a_4) \cdot \frac{2}{3} \cdot M \right) = \frac{M^2}{3} (\alpha'_6 + a_5 + a_4) \cdot$$

$$\cdot \frac{1}{EI} = \frac{(b + a_4)(a_5 + a_4)^2 \cdot \alpha'_6}{3EI(b + a_4)^2} = \frac{\alpha'^2_6 (a_5 + a_4)^2}{3EI(b + a_4)};$$

Шукаємо σ_{22} :

Визначаємо реакції опор :

$$R_B = \frac{a_5 + \alpha'_6}{b + a_4} = \frac{b}{b + a_4}; R_A = \frac{a_4}{b + a_4};$$

Звідси :
$$M = R_A = \frac{a_4(a_5 + \alpha'_6)}{b + a_4} = \frac{a_4 \cdot b}{b + a_4}$$

Використовуємо метод Верещагіна :

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{2} \cdot b \cdot M \cdot \frac{2}{3} \cdot M + \frac{1}{2} \cdot a_4 M \cdot \frac{2}{3} \cdot M \right) = \frac{M^2}{3EI} (b + a_4) =$$

$$\cdot \frac{M^2}{3EI} = (a_5 + \alpha'_6 + a_4) \frac{a_4(a_5 + \alpha'_6)^2}{3EI(b + a_4)} = \frac{\alpha'^2_4 b^2}{3EI(b + a_4)};$$

$$\mu = \frac{\delta_{11} \cdot (a_4 + a_5)^2 \alpha_6'^2}{\delta_{22} \cdot 3EI(b + a_4)} \cdot \frac{3EI(b + a_4)}{\alpha_4'^2 b^2} = \frac{(a_4 + a_5)^2 \alpha_6'^2}{\alpha_4'^2 b^2};$$

Отже: $m_{np}'' = m_3 + m_4 \cdot \frac{(a_4 + a_5)^2 \alpha_6'^2}{\alpha_4'^2 b^2};$

$$m_{np}'' = 0.28 + 13.71 \cdot \frac{290^2 (55 + 255)}{55^2 \cdot 545^2} = 123.6 (\text{кг});$$

Зводимо масу m_{np}^I в масу m_5 Для цього розглянемо ділянку шпинделя.

$$M_1 = m_5 = m_{np}^I \cdot \mu.$$

$$\text{де } \mu = \frac{\delta_{11}}{\delta_{22}}$$

$$C = a_4 + a_5 + a_6 = 55 + 255 + 250 = 560 (\text{мм}).$$

Шукаємо σ_{11} :

Визначаємо реакції опор:

$$\sum M_A = P \cdot a_8 - R_B \cdot l = 0; R_B = \frac{a_8}{l};$$

$$\sum M_B = P(a_8 + l) - R_A \cdot l = 0; R_A = \frac{a_8 + l}{l};$$

Звідси: $M = P \cdot a_8 = a_8 \cdot$

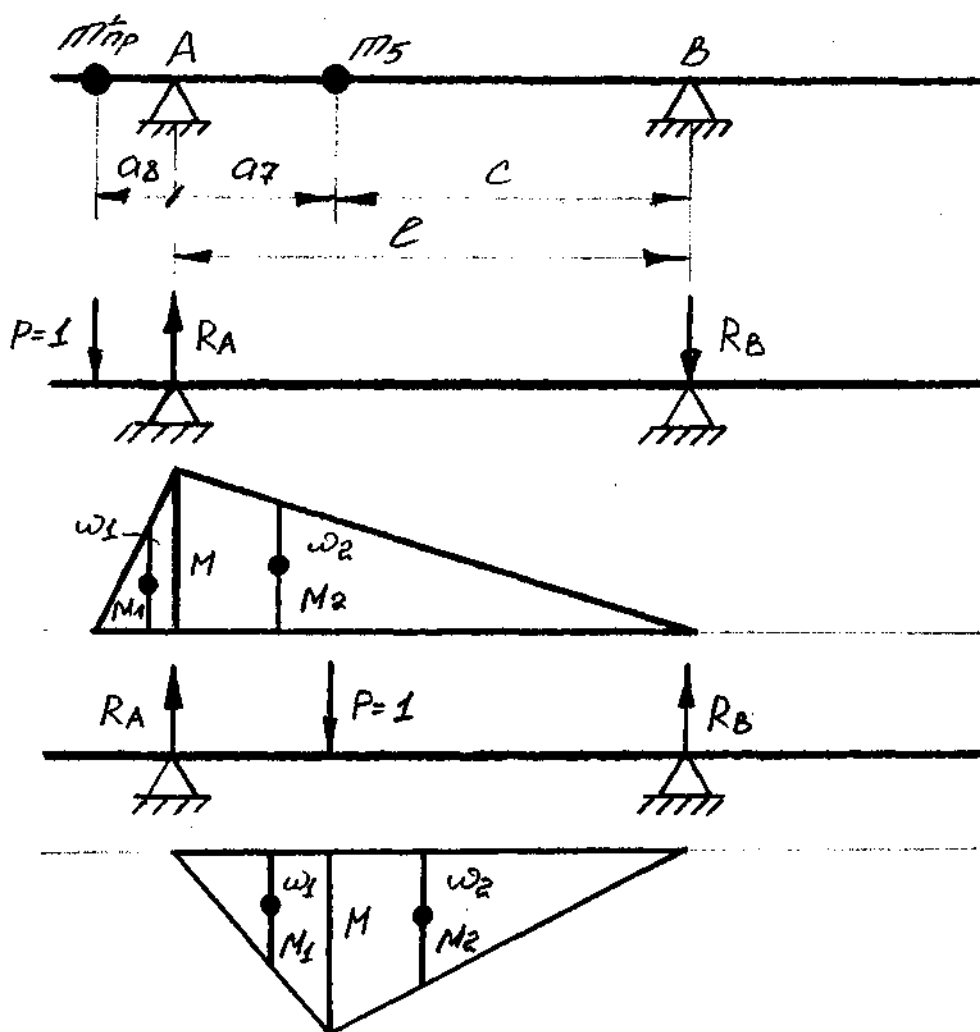


Рисунок 3.18 - Зведення маси m_{pr}^I в масу m_5 .

Використовуємо метод Верещагіна :

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{2} \alpha_8 \cdot M \cdot \frac{2}{3} \cdot M + \frac{1}{2} \cdot l \cdot M \cdot \frac{2}{3} \cdot M \right) = \frac{M^2}{3EI} (b + a_8) = \frac{a_4^2 (b + a_4)}{3EI};$$

Шукаємо σ_{22} :

Визначаємо реакції опор:

$$R_B = \frac{a_7}{a_7 + c}; R_A = \frac{c}{a_7 + c};$$

Звідси:
$$M = R_A \cdot a_7 = \frac{c \cdot a_7}{(c + a_7)};$$

Використовуємо метод Верещагіна :

$$\delta_{22} = \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{2} \cdot \alpha_7 \cdot M \cdot \frac{2}{3} \cdot M + \frac{1}{2} \cdot C \cdot M \cdot \frac{2}{3} \cdot M \right) = \frac{c^2 \cdot \alpha_7^2}{3EI(c + \alpha_7)};$$

Звідси:
$$\mu = \frac{\delta_{11} \cdot (a_8 + l)^2 \cdot \alpha_8^2 \cdot 3EI(c + \alpha_7)}{\delta_{22} \cdot \alpha_7^2 c^2} = \frac{\alpha_8^2 (a_8 + l) l}{\alpha_7^2 c^2};$$

Отже:
$$M_1 = m_3 + m_{np}^I \cdot \frac{\alpha_8^2 (a_4 + a_5) l}{\alpha_7^2 c^2};$$

$$M_1 = 1.19 + 5.23 \cdot \frac{50^2 (50 + 600)}{560^2 \cdot 40^2} = 11.35 (\text{кз});$$

Зводимо масу m_{np}^{II} в масу m_2 Для цього розглянемо ділянку шпинделя

$$m_{np}^{III} = m_2 = m_{np}^{II} \cdot \mu.$$

де
$$\mu = \frac{\delta_{11}}{\delta_{22}}$$

$$C = a_5 + a_6 + a_7 = 255 + 250 + 40 = 545 (\text{мм}).$$

Визначаємо реакції опор:

$$R_B = \frac{b}{a_7 + b}; R_A = \frac{a_4}{a_4 + b};$$

Звідси:
$$M = R_A \cdot b = \frac{b \cdot a_4}{(b + a_4)};$$

Використовуємо метод Верещагіна :

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{2} \cdot b \cdot M \cdot \frac{2}{3} \cdot M + \frac{1}{2} \cdot \alpha_4 \cdot M \cdot \frac{2}{3} \cdot M \right) = \frac{b^2 \cdot \alpha_4^2}{3EI(b + \alpha_4)};$$

Шукаємо σ_{22} :

Визначаємо реакції опор:

$$R_B = \frac{a_7 + l}{l}; R_A = \frac{a_3}{l};$$

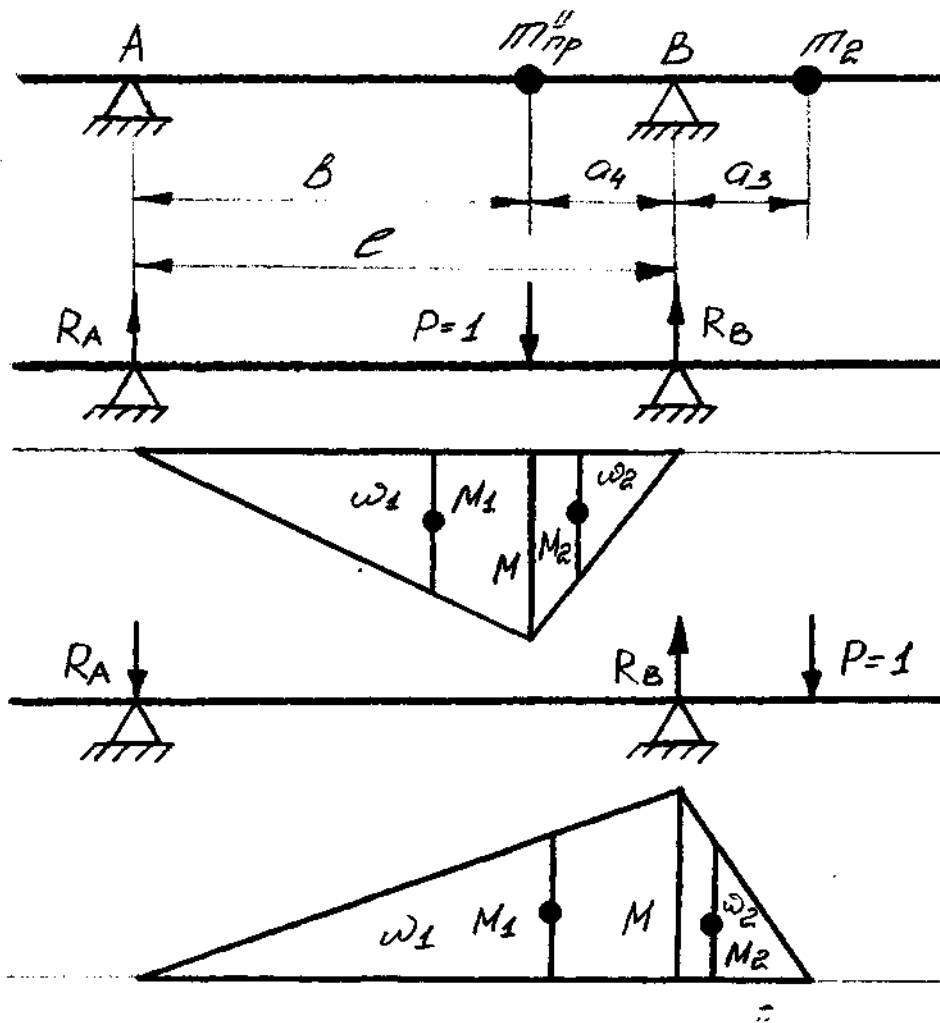


Рисунок 3.19 - Зведення маси m_{np}^{II} в масу m_2 .

Звідси: $M = P \cdot a_3 = \alpha_3$;

Використовуємо метод Верещагіна :

$$\delta_{22} = \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{2} \cdot \alpha_3 \cdot M \cdot \frac{2}{3} \cdot M + \frac{1}{2} \cdot l \cdot M \cdot \frac{2}{3} \cdot M \right) = \frac{\alpha_3^2 (l + \alpha_3)}{3EI};$$

Звідси:
$$\mu = \frac{\delta_{11}}{\delta_{22}} \cdot \frac{\alpha_3^2 \cdot b^2}{3EI(a_4 + l)} \cdot \frac{3EI}{\alpha_3^2 (\alpha_3 + l)} = \frac{\alpha_4^2 \cdot b^2}{\alpha_3^2 (\alpha_3 + l) \cdot l};$$

Отже:
$$m_{np}^{III} = m_2 + m_{np}^{II} \cdot \frac{\alpha_4^2 \cdot b^2}{\alpha_3^2 (a_4 + a_5) \cdot l};$$

$$m_{np}^{III} = 0.01 + 123.6 \cdot \frac{55^2 \cdot 545^2}{10^2 \cdot (10 + 600) \cdot 600} = 3034.3 (\text{кг});$$

Зводимо масу m_{np}^{III} в масу m_1 Для цього розглянемо ділянку шпинделя.

$$m_{np}^{IV} = m_1 = m_{np}^{III} \cdot \mu.$$

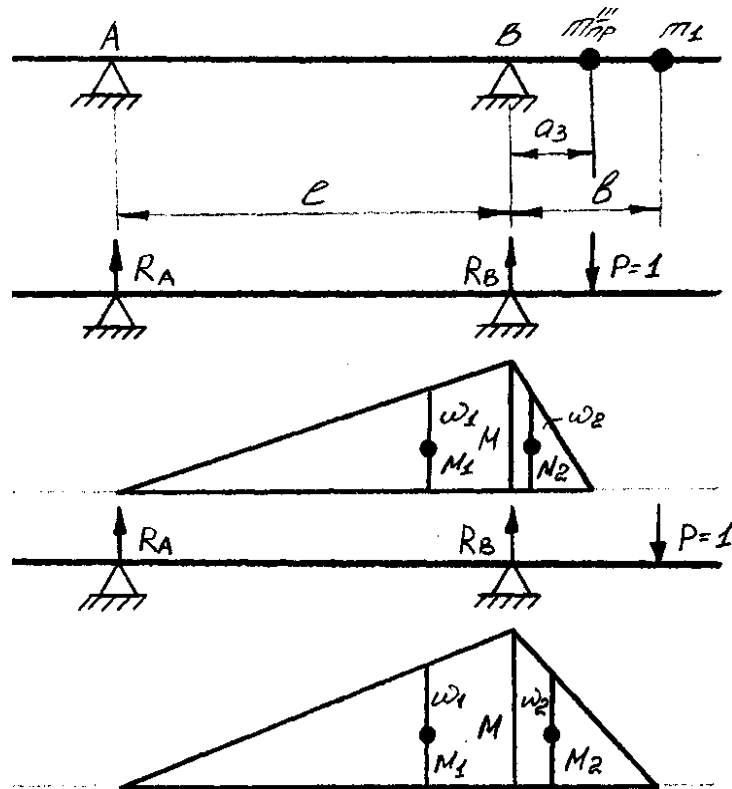


Рисунок 3.20 - Зведення маси m_{III} в масу m_I

де
$$\mu = \frac{\delta_{11}}{\delta_{22}}$$

$$b = a_2 + a_3 = 100 + 10 = 110 (\text{мм}).$$

Шукаємо σ_{11} :

Визначаємо реакції опор:

$$R_B = \frac{a_3 + l}{l}; R_A = \frac{a_3}{l};$$

Звідси: $M = P \cdot a_3 = \alpha_3;$

Використовуємо метод Верещагіна :

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{2} \cdot \alpha_3 \cdot M \cdot \frac{2}{3} \cdot M + \frac{1}{2} \cdot l \cdot M \cdot \frac{2}{3} \cdot M \right) = \frac{\alpha_3^2 (l + \alpha_3)}{3EI};$$

Шукаємо σ_{22} :

Визначаємо реакції опор:

$$R_B = \frac{b + l}{l}; R_A = \frac{b}{l};$$

Звідси: $M = P \cdot b = b;$

Використовуємо метод Верещагіна :

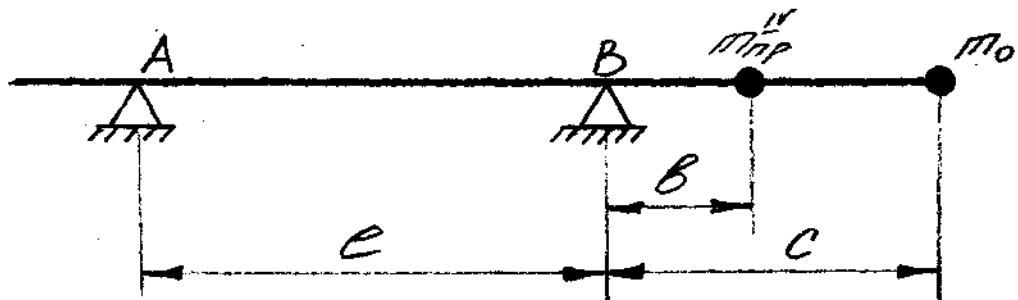
$$\delta_{22} = \frac{b^2(b+l)}{3EI};$$

Звідси: $\mu = \frac{\delta_{11}}{\delta_{22}} \cdot \frac{\alpha_3^2(a_3+l)}{3EI} \cdot \frac{3EI}{b^2(b+l)} = \frac{\alpha_3^2(a_3+l)}{b^2(b+l)};$

Отже: $m_{np}^{IV} = m_1 + m_{np}^{III} \cdot \frac{\alpha_3^2(a_3+l)}{b^2(b+l)};$

$$m_{np}^{IV} = 7.96 + 3034.3 \cdot \frac{10^2 \cdot (10 + 600)}{110^2 \cdot (100 + 600)} = 29.5(\text{кг});$$

Зводимо масу m_{np}^{IV} в масу m_0 Для цього розглянемо ділянку шпинделя.



$$b = a_2 + a_3 = 100 + 10 = 110(\text{мм}).$$

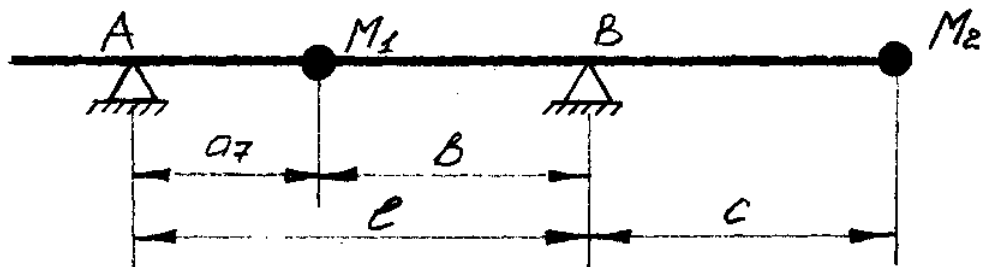
$$C = a_1 + a_2 + a_3 = 90 + 100 + 10 = 200(\text{мм}).$$

Аналогічно попередньому розрахунку дістанемо вираз:

Отже: $M_2 = m_{np}^{IV} \cdot \frac{\alpha_3^2(a_3+l)}{b^2(b+l)};$

$$M_2 = 295 \cdot \frac{110^2 \cdot (110 + 600)}{200^2 \cdot (200 + 600)} = 7.92(\text{кг});$$

Зводимо масу M_1 в масу M_2 Для цього розглянемо ділянку шпинделя.



$$b=a_4+a_5+a_6=55+255+250=560(\text{мм}).$$

Аналогічно попередньому розрахунку дістанемо вираз:

$$M=M_2+M_1\cdot\mu$$

$$M = M_2 + M_1 \cdot \frac{b^2 \cdot a_7^2}{c^2(c+l)l}$$

$$M = 7.92 + 11.35 \cdot \frac{560^2 \cdot 40^2}{200^2 \cdot (200 + 600)600} = 8.21(\text{кз})$$

Визначаємо частоти і формули власних коливань для балки постійного січення з двома масами M_1 і M_2 . для цього спочатку визначаємо коефіцієнти $\delta_{11}, \delta_{22}, \delta_{12} = \delta_{21}$

Визначаємо коефіцієнти σ_{11}

$I \neq \text{const.}$

Визначаємо реакцію опор R_A і R_B і момент в точці прикладення сили $P=1$;

$$\sum M_A = P \cdot c_6 - R_B \cdot l = 0; R_B = \frac{c_6}{l} = \frac{40}{600} = 6,6 \cdot 10^{-2} \text{ мм} \cdot \text{Н};$$

$$\sum M_B = P(c_5 + c_4 + c_3) - R_A \cdot l = 0; R_A = \frac{c_3 + c_4 + c_5}{l} = 93,3 \cdot 10^{-2} \text{ мм} \cdot \text{Н};$$

$$\text{Звідси: } M_x = M_\xi = \frac{c_6(c_3 + c_4 + c_5)}{l} = \frac{40(110 + 400 + 50)}{600} = 37.3$$

$$M_1 = R_B(c_3 + c_4) = 6.6 \cdot 10^{-2}(110 + 400) = 33.66$$

$$M_2 = M_\xi - M_1 = 37.3 - 33.66 = 3.64$$

$$M_3 = M_\xi - M_2 = 37.3 - 3.64 = 33.66$$

$$M_4 = R_B \cdot c_3 = 6.6 \cdot 10^{-2} \cdot 110 = 7.26$$

Шукаємо площі:

$$W_1 = \frac{1}{2} \cdot c_6 \cdot M_\xi = \frac{1}{2} \cdot 40 \cdot 37.3 = 746(\text{мм})$$

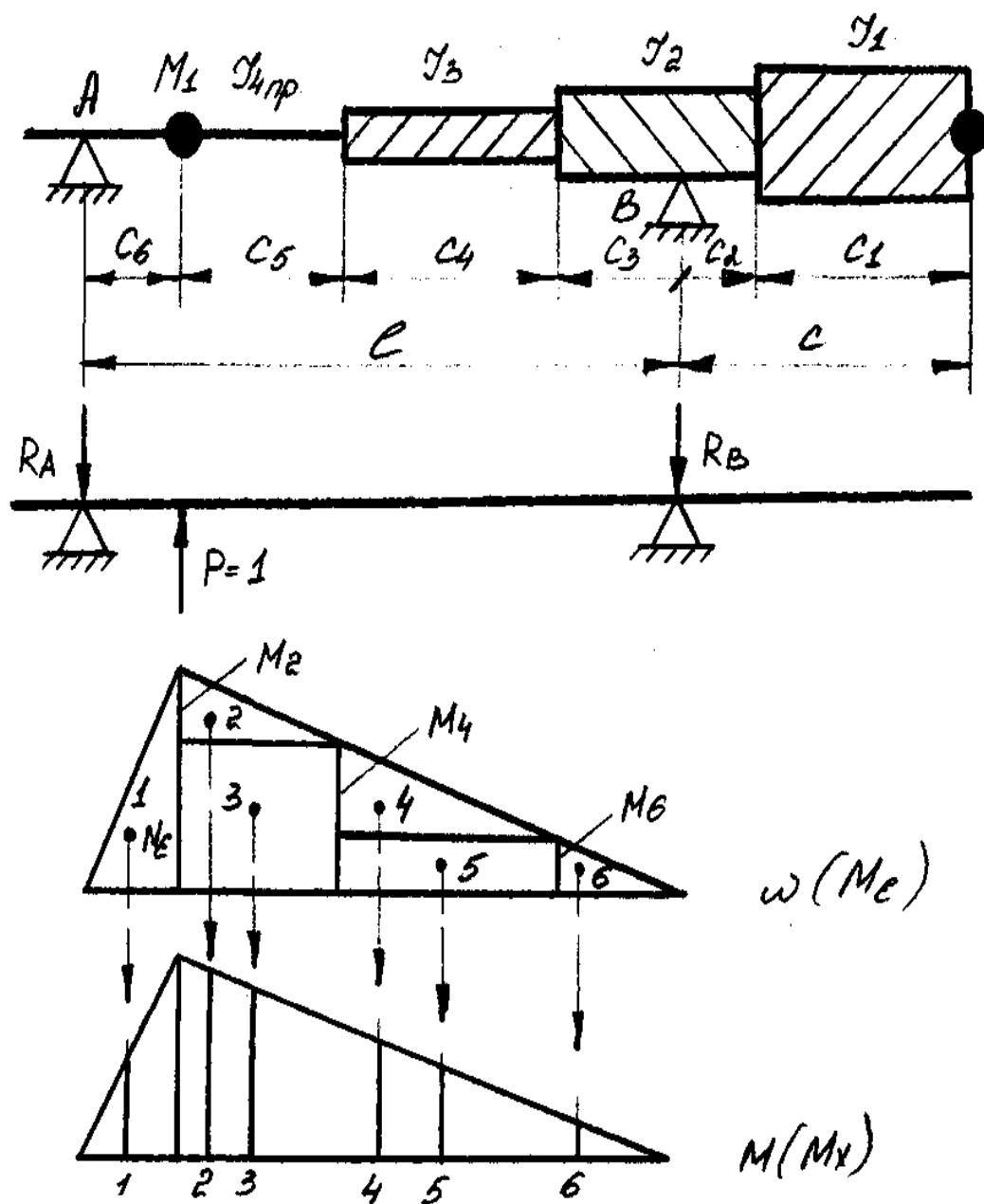


Рисунок 3.21 - Розрахункова схема для визначення коефіцієнта δ_{11} .

$$C_1=180 \text{ (мм)}$$

$$C_4=400 \text{ (мм)}$$

$$C_7=200 \text{ (мм)}$$

$$C_2=20 \text{ (мм)}$$

$$C_5=50 \text{ (мм)}$$

$$C_8=600 \text{ (мм)}$$

$$C_3=110 \text{ (мм)}$$

$$C_6=40 \text{ (мм)}$$

Площа:

$$W_1 = 1/2 \cdot M_2 \cdot C_5 = 1/2 \cdot 3,64 \cdot 50 = 91 \text{ мм}$$

$$W_3 = M_1 \cdot C_5 = 33,66 \cdot 50 = 1683 \text{ мм}$$

$$W_4 = 1/2 \cdot M_4 \cdot C_4 = 1/2 \cdot 7,26 \cdot 400 = 1452 \text{ мм}$$

$$W_5 = 1/2 \cdot M_4 \cdot C_4 = 1/27,26 \cdot 400 = 2904 \text{ мм}$$

$$W_6 = 1/2 \cdot M_1 \cdot C_3 = 1/2 \cdot 33,66 \cdot 110 = 1851,3 \text{ мм}$$

Момент під координатою центра ваги :

$$M_1 = 2/3 \cdot M_x = 2/3 \cdot 3,6 \cdot 50 = 91$$

$$M_2 = 2/3 \cdot M_2 + M_1 = 2/3,64 + 33,66 = 36,08$$

$$M_3 = 2/3 \cdot M_2 + M_1 = 1/2 \cdot 3,64 + 33,66 = 35,44$$

$$M_4 = 2/3 \cdot M_4 + M_3 = 2/3 \cdot 7,26 + 33,66 = 38,9$$

$$M_5 = 1/2 \cdot M_4 + M_3 = 1/2 \cdot 7,26 + 33,66 = 37,29$$

$$M_6 = 2/3 \cdot M_1 = 2/3 \cdot 33,66 = 22,44$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI_2} M_6 \cdot W_6 + \frac{1}{EI_3} (M_4 W_4 + M_5 W_5) + \frac{1}{EI_{4np}} (M_1 W_1 + M_2 W_2 + M_3 W_3) = 5,6 \cdot 10^{-7} (\text{мм/Н})$$

Визначаємо коефіцієнт δ_{22}

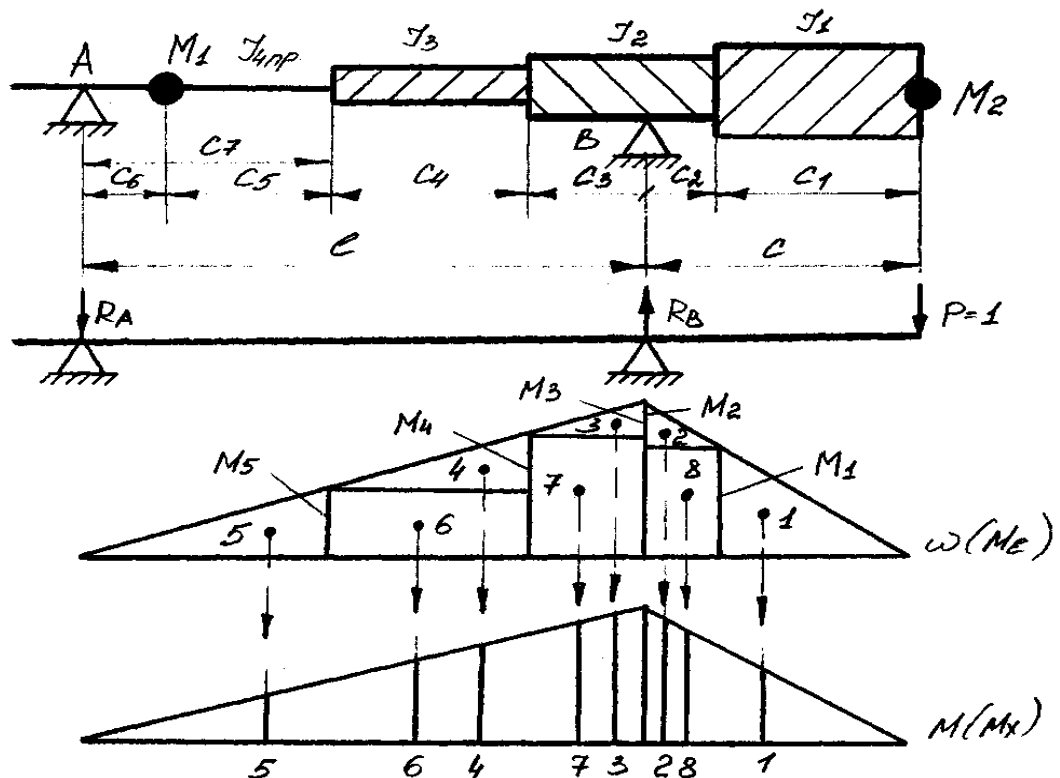


Рисунок 3.22 - Розрахункова схема для визначення коефіцієнта δ_{22} .

Визначаємо реакції опор:

$$R_B = \frac{c+l}{l}; R_A = \frac{c}{l};$$

Моменти :

$$M_1 = C_1 = 180(\text{мм} \cdot \text{Н})$$

$$M_2 = C_2 = 20(\text{мм} \cdot \text{Н})$$

$$M_3 = R_A \cdot l = 0.33 \cdot 600 = 200(\text{мм} \cdot \text{Н})$$

$$M_4 = R_A (C_4 + C_7) = 0.33(400 + 90) = 163.3(\text{мм} \cdot \text{Н})$$

$$M_5 = R_A \cdot C_7 = 0.33 \cdot 90 = 30(\text{мм} \cdot \text{Н})$$

Площа:

Момент під координатою центра ваги :

$$M_1 = 2/3 \cdot M_1 = 2/3 \cdot 180 = 120$$

$$M_2 = 2/3 \cdot M_2 + M_1 = 2/3 \cdot 20 + 180 = 193,3$$

$$M_3 = 2/3 \cdot M_3 + M_4 + M_5 = 2/3 \cdot 200 + 163,3 + 30 = 326,63$$

$$M_4 = 2/3 \cdot M_4 + M_5 = 2/3 \cdot 163,3 + 30 = 138,86$$

$$M_5 = 2/3 \cdot M_5 = 2/3 \cdot 30 = 20$$

$$M_6 = 1/2 \cdot M_4 + M_5 = 1/2 \cdot 163,3 + 30 = 111,6$$

$$M_7 = 1/2 \cdot M_3 + M_4 + M_5 = 1/2 \cdot 200 + 163,3 + 30 = 293,3$$

$$M_8 = 1/2 \cdot M_2 + M_1 = 1/2 \cdot 20 + 180 = 190$$

Таблиця 3.45.

п/п	I	Значення	W	Значення	M	Значення	M·w/E·I
1	I ₁	503·10 ⁴	W ₁	16200	M ₁	120	1.93·10 ⁻⁶
2	I ₂	452·10 ⁴	W ₂	200	M ₂	193.3	1.02·10 ⁻⁸
3	I ₂	452·10 ⁴	W ₃	11000	M ₃	326.63	3.97·10 ⁻⁶
4	I ₃	291.2·10 ⁴	W ₄	32660	M ₄	138.86	7.78·10 ⁻⁶
5	I _{4ПР}	160.7·10 ⁴	W ₅	1350	M ₅	20	8.39·10 ⁻⁸
6	I ₃	291.2·10 ⁴	W ₆	12000	M ₆	111.65	2.3·10 ⁻⁶
7	I ₂	452·10 ⁴	W ₇	21263	M ₇	293.3	6.89·10 ⁻⁶
8	I ₂	452·10 ⁴	W ₈	1800	M ₈	190	3.68·10 ⁻⁸
Сума						2,3·10 ⁻⁵	

$$\delta_{22} = 2,3 \cdot 10^{-5} (\text{мм} / \text{Н})$$

Визначаємо коефіцієнт $\delta_{22} = \delta_{21}$.

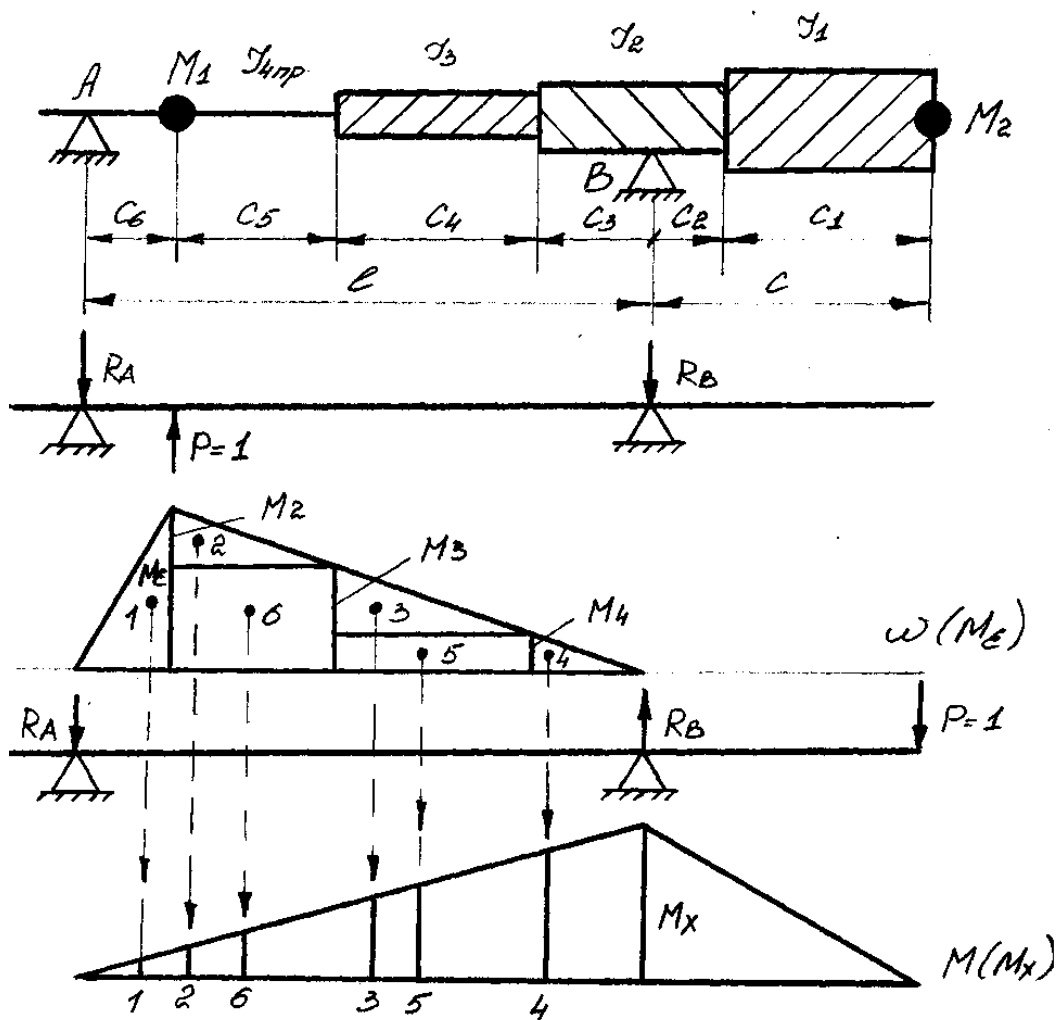


Рисунок 3.23 - Розрахункова схема для визначення коефіцієнта δ_{12} .

Визначаємо реакції опор R_A і R_B і момент в точці прикладення сили $P=1$.

$$\Sigma M_A = P \cdot C_6 - R_B \cdot l = 0; \Sigma M_B = P(C_5 + C_4 + C_3) - R_A \cdot l = 0;$$

$$R_B = \frac{C_6}{l} = 6.6 \cdot 10^{-2} (\text{мм} \cdot \text{Н}); R_A = \frac{C_5 + C_4 + C_3}{l} = 93.3 \cdot 10^{-2} (\text{мм} \cdot \text{Н});$$

$$M_\xi = R_A \cdot C_6 = 93.3 \cdot 10^{-2} \cdot 40 = 37.32$$

$$M_3 = R_B (C_3 + C_4) = 6.6 \cdot 10^{-2} (110 + 400) = 33.66$$

$$M_4 = R_B \cdot C_3 = 6.6 \cdot 10^{-2} \cdot 110 = 7.26$$

Шукаємо площі :

$$W_1 = \frac{1}{2} \cdot M_{\xi} \cdot C_6 = \frac{1}{2} \cdot 37,32 \cdot 40 = 746,4 \text{ мм}$$

$$W_2 = \frac{1}{2} \cdot (M_{\xi} \cdot M_3) \cdot C_5 = \frac{1}{2} \cdot (37,32 - 33,66) \cdot 50 = 91,5 \text{ мм};$$

$$W_3 = \frac{1}{2} \cdot (M_{\xi} \cdot M_4) \cdot C_4 = \frac{1}{2} \cdot (37,32 - 7,26) \cdot 400 = 60,12 \text{ мм};$$

$$W_4 = \frac{1}{2} \cdot M_4 \cdot C_3 = \frac{1}{2} \cdot 7,26 \cdot 110 = 399,3 \text{ мм};$$

$$W_5 = M_4 \cdot C_4 = 7,26 \cdot 400 = 2904 \text{ мм};$$

$$W_6 = M_3 \cdot C_5 = 33,66 \cdot 50 = 1683 \text{ мм}.$$

Моменти під координатою центру ваги:

$$M_1 = \frac{M_x}{l} \cdot \frac{2}{3} \cdot C_6 = \frac{C}{l} \cdot \frac{2}{3} \cdot C_6 = \frac{200}{600} \cdot \frac{2}{3} \cdot 40 = 8,88^2$$

$$M_2 = \frac{M_x}{l} \left(C_6 + \frac{1}{3} + C_5 \right) = \frac{1}{3} \left(40 + \frac{1}{3} \cdot 50 \right) = 18,88$$

$$M_3 = \frac{M_x}{l} \left(C_6 + C_5 + \frac{1}{3} C_4 \right) = \frac{1}{3} \left(40 + 50 + \frac{1}{3} \cdot 400 \right) = 74,44$$

$$M_4 = \frac{M_x}{l} \left(C_6 + C_5 + C_4 + \frac{1}{3} C_3 \right) = \frac{1}{3} \left(40 + 50 + 400 + \frac{1}{3} \cdot 110 \right) = 175,55$$

$$M_5 = \frac{M_x}{l} \left(C_6 + C_5 + C_4 + \frac{1}{2} C_3 \right) = \frac{1}{3} \left(40 + 50 + \frac{1}{2} \cdot 400 \right) = 96,66$$

$$M_6 = \frac{M_x}{l} \left(C_6 + \frac{1}{2} + C_5 \right) = \frac{1}{3} \left(40 + \frac{1}{2} \cdot 50 \right) = 21,66$$

$$\delta_{12} = \frac{1}{EI_2} M_4 \cdot W_4 + \frac{1}{EI_3} (M_3 W_3 + M_5 W_5) + \frac{1}{EI_{4np}} \cdot (M_1 W_1 + M_2 W_2 + M_3 W_3) = 1,46 \cdot 10^{-7} (\text{мм/Н})$$

Рішення проводимо з використанням матриць.

$$A = \begin{vmatrix} \rho^2 \delta_{11} M_1 - 1 & \dots & \rho^2 \delta_{12} M_2 \\ \rho^2 \delta_{21} M_1 & \dots & \rho^2 \delta_{22} M_2 - 1 \end{vmatrix} = 0$$

Звідси :

$$(\rho^2 \delta_{22} M_2 - 1) \cdot (\rho^2 \delta_{11} M_1 - 1) - \rho^4 \delta_{21} \delta_{12} M_1 M_2 = 0$$

$$\rho^2 \delta_{22} M_2 \rho^2 \delta_{11} M_1 - \rho^2 \delta_{22} M_2 \rho^2 \delta_{11} M_1 + 1 - \rho^4 \delta_{21} \delta_{12} M_1 M_2 = 0$$

$$\rho^4 M_1 M_2 (\delta_{22} \delta_{11} - \delta_{21} \delta_{12}) - \rho^2 (\delta_{22} M_2 + \delta_{11} M_1) + 1 = 0$$

Розв'язуємо дане рівняння .

$$\rho_{1,2} = \sqrt{\frac{(\delta_{22} M_2 + \delta_{11} M_1) \pm \sqrt{(\delta_{22} M_2 + \delta_{11} M_1)^2 - 4(\delta_{22} \delta_{11} - \delta_{21} \delta_{12}) M_1 M_2}}{2 M_1 M_2 (\delta_{22} \delta_{11} - \delta_{21} \delta_{12})}};$$

Підставляємо значення:

$$M_1 = 11,35(\text{кг})$$

$$M_2 = 7,92(\text{кг})$$

$$\delta_{11} = 5,6 \cdot 10^{-7} (\text{мм} / \text{H}) = 5,6 \cdot 10^{-10} (\text{м} / \text{H}).$$

$$\delta_{22} = 2,3 \cdot 10^{-5} (\text{мм} / \text{H}) = 2,3 \cdot 10^{-10} (\text{м} / \text{H}).$$

$$\delta_{12} = 1,46 \cdot 10^{-6} (\text{мм} / \text{H}) = 1,46 \cdot 10^{-10} (\text{м} / \text{H}).$$

$$\rho_1 = 2102,9 (\text{рад} / \text{с}) = 334,6 (\text{Гц})$$

$$\rho_2 = 58659 (\text{рад} / \text{с}) = 633,4 (\text{Гц})$$

Шукаємо приєднану матрицю.

$$\Delta = \begin{vmatrix} \rho_1^2 \delta_{22} m_2 - 1 & \dots & \rho_1^2 \delta_{21} m_1 \\ \rho^2 \delta_{12} m_2 & \dots & \rho_2^2 \delta_{11} m_1 - 1 \end{vmatrix}$$

$$\Delta^T = \begin{vmatrix} \rho_1^2 \delta_{22} m_2 - 1 & \dots & -\rho_2^2 \delta_{21} m_2 \\ -\rho_1^2 \delta_{21} m_1 & \dots & \rho_2^2 \delta_{11} m_1 - 1 \end{vmatrix}$$

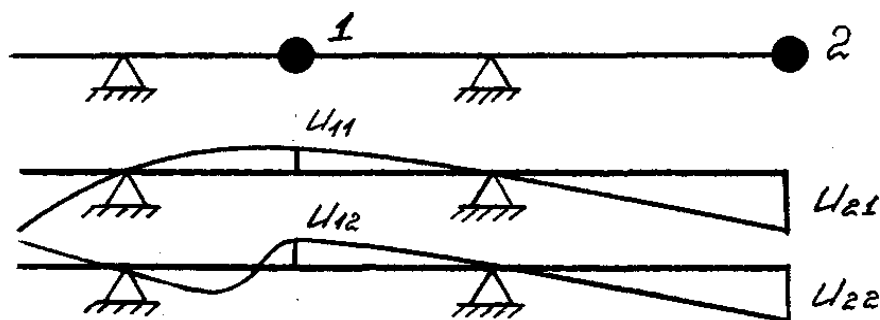
Якщо $U_{11} = U_{12} = 1$, тоді :

$$U_{11} = \rho_1^2 \cdot \delta_{22} \cdot m_2 - 1 = 334.6^2 \cdot 2.3 \cdot 10^{-8} \cdot 7.92 - 1 = -0.98.$$

$$U_{12} = \rho_2^2 \cdot \delta_{12} \cdot m_2 = -933.4^2 \cdot 1.46 \cdot 10^{-9} \cdot 7.92 = 1 \cdot 10^{-2}.$$

$$U_{22} = \rho_2^2 \cdot \delta_{11} \cdot m_1 - 1 = 933.4^2 \cdot 5.6 \cdot 10^{-10} \cdot 11.35 - 1 = -0.99.$$

Звідси форма коливань буде мати набуде вигляду.



3.2 Розрахунок тягового пристрою .

3.2.1 Розробка розрахункової схеми

Особистістю цієї передачі є наявність змішаного тертя і пов'язаного з ним зношення, що дозволяє надійно фіксувати рухомий вузол, наявність при його вертикальному переміщенні.

Згідно рекомендацій [4, табл. 16] вибираємо матеріал гвинта і матеріал гайки. Для токарно – гвинторізних верстатів нормальної точності матеріал гвинта – антифрикційні чавуни (Бр.ОЦС 5-5-5).

Використовуємо трапецеїдальний профіль різі з кутом 30° . Розрахунок передачі гвинт – гайка ковзання з умови зносостійкості передач є обмеження питомих тисків на робочих гранях гайки.

Середній тиск :

$$P = \frac{Q}{\pi \cdot d \cdot H \cdot \frac{l \cdot z}{t}} \leq [P].$$

Де Q - тягове зусилля, H

d- середній діаметр різі .мм

H- робоча висота профілю різі .мм

L- довжина гайки ,мм

$L=\lambda \cdot d=(1.5 \dots 4) \cdot 1.15=(17.25 \dots 46) \text{ мм}$

λ - коефіцієнт податливості гвинта

t-крок різі ,мм

z- кількість заходів різі

[P]- допустимий питомий тиск ,МПа

$[P]=6(\text{МПа})$ [1,табл.17]

$$P = \frac{Q}{\pi \cdot d \cdot H \cdot \frac{l \cdot z}{t}} = \frac{2877.44}{3.14 \cdot 11.5 \cdot 1.866 \cdot \frac{181}{12}} = 2.37(\text{МПа})$$

$P=2,37(\text{МПа}) < [P]=6(\text{МПа})$.

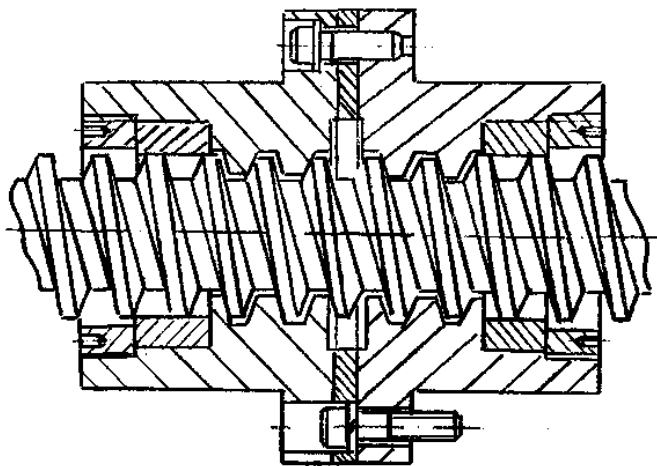


Рисунок 3.24 - Передача гвинт - гайка ковзання .

3.2.1 Розрахунок тягового пристрою за критерієм жорсткості .

Розрахунок передач на жорсткість передач є визначення зміни кроку різі Δt при розтягу – стиску по залежності .

$$\Delta t = \pm \frac{Q \cdot t}{E \cdot F}; \dots$$

Де $E = 2.1 \cdot 10^5$ (МПа) - модуль пружності .

$F = \pi d^2 / 4$ - площа поперечного перерізу.

$$\Delta t = \pm \frac{Q \cdot t}{E \cdot F} = \frac{2877,44 \cdot 12}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 9,42} = 14,5 \cdot 10^{-3} \text{ (мм)}$$

Розраховуємо ходовий гвинт на міцність з врахуванням обертового моменту $T_{об}$, по такій залежності.

$$\sigma_0 = \sqrt{\left(\frac{H \cdot Q}{\pi \cdot d^2} \right)^2 + 4 \left(\frac{T_{об}}{\pi \cdot d^3} \right)^2} \leq \frac{\sigma_m}{3.5};$$

де $T_{об}$ – обертовий момент, який прикладений до гвинта, Н·мм.

σ_m – межа текучості для матеріалу гвинта, МПа:

$$\sigma_0 = \sqrt{\left(\frac{1.866 \cdot 2877.44}{3.14 \cdot 12^2} \right)^2 + 4 \left(\frac{12.2 \cdot 10^3}{3.14 \cdot 12^3} \right)^2} \leq \frac{360}{3.5};$$

$$\sigma_0 = 12.7 \text{ (МПа)}$$

Приймаємо рекомендовані співвідношення конструктивних параметрів різі в залежності по визначенню середнього тиску знаходимо середній діаметр різі по формулі [4, с37].

$$d = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot [P]}} = 0.8 \cdot \frac{2877.44}{(17.25 \dots 46) \cdot 2.37};$$

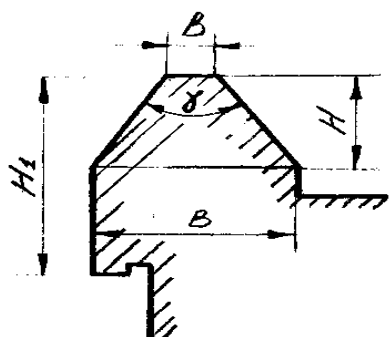
$d = (7.3 \dots 26.3) \text{ мм.}$

Приймаючи до уваги крок ходового гвинта в кінематичному розрахунку механізму приводу подач по ГОСТу 9488-73 вибираємо різь трапецеїдальну однозахідну діаметром $\varnothing 26$ мм. З кроком $t = 12$ мм.

3.3 Розрахунок направляючих

3.3.1 Конструктивне виконання.

Січення напрямних тертя ковзання нормалізовані (рис.4.30). Відношення розмірів січень залежить від висоти направляючих. Відношення довжини рухомої деталі до загальної ширини (ширина направляючих і відстань між ними) направляючих повинна бути в межах 1,5-2. Довжину нерухомих направляючих приймають такою щоб не було провисання рухомої деталі. Накладні направляючі кріплять до базової деталі по всій їх довжині. При кріпленні гвинтами крок між ними для запобігання скривлення і короблення повинен бути не більше за двох кратну висоту накладної планки. При механічному кріпленні або приклеюванні накладних направляючих необхідно передбачити фіксацію їх в попередньому напрямку різними центруючими виступами, поверхнями, фасками.



$$H = 16 \div 20 \text{ мм}$$

$$H_1 = 2,2 \div 2,3H$$

$$b \approx 0.2H$$

3.25 Розрахункова схема

Розрахункова схема для розрахунку сил наведена на рис.4.26.

3.3.2 Розрахунок деформації і контактних тисків (напружень) в напрямних.

При переміщенні супорта по направляючим станини на нього діють сили різання (P_x , P_y , P_z), сила тяги Q , яка переміщує супорт, і сила ваги супорта G . В

результаті діючих зовнішніх сил в направляючих виникають реакції, які і визначають епюру тиску в кожній направляючій.

Вісі координат співпадають з напрямком відповідних складових сил різання а початок координат вибираємо в точці переміщення реакцій на трикутній направляючій, а по довжині в середині направляючих. Проектуємо ці сили на осі і візьмемо силу моментів відносно осей

$$\begin{cases} \Sigma X = -P_X + Q_X - (A + B + C) \cdot f = 0; \\ \Sigma Y = B \cdot \sin \beta - A \cdot \sin \alpha - P_Y = 0; \\ \Sigma Z = B \cdot \sin \beta - A \cdot \sin \alpha + C - P_Z - G - Q_Z = 0; \\ \Sigma M_X = P_Y \cdot Z_P + C \cdot Y_C - P_Z \cdot Y_P - G \cdot Y_G = 0 \\ \Sigma M_Y = P_X \cdot Z_P + Q_X \cdot Z_Q - P_Z \cdot X_P - Q_Z \cdot X_Q - G \cdot X_G + \\ + A \cdot \cos \alpha \cdot X_A + B \cdot \cos \beta \cdot X_B + C \cdot X_C = 0 \\ \Sigma M_Z = -P_Y \cdot X_P - A \cdot \sin \alpha \cdot X_A + P_X \cdot Y_P + B \cdot \sin \beta \cdot X_B + C \cdot f \cdot Y_C = 0 \end{cases}$$

де f – коефіцієнт тертя

$$f=0,1+0,2$$

Невідомими в даній системі являються реакції в направляючих A , B і C ; сила тяги Q і координати прикладання реакцій X_A , X_B , X_C . Тому є 7 невідомих і задача являється статично невизначеною. Встановлюємо роз приділення зовнішніх повертаючи моментів M_Y^B між направляючими. ($= \geq (5)$)

$$\begin{aligned} M_Y^B &= -(P_X \cdot Z_P - P_Z \cdot X_P + Q \cdot Z_Q - G \cdot X_X) \\ M_Y^B &= A \cdot X_A \cdot \cos \alpha + B \cdot X_B \cdot \cos \beta + C \cdot X_C \end{aligned}$$

Встановлюємо як цей момент розприділюється між передньою і задньою направляючою з врахуванням супорта або направляючих. Для цього момент M_Y^B

розбиваємо на 2 перевертаючих момента:

$$M_Y^B = M_Y^I + M_Y^{II}.$$

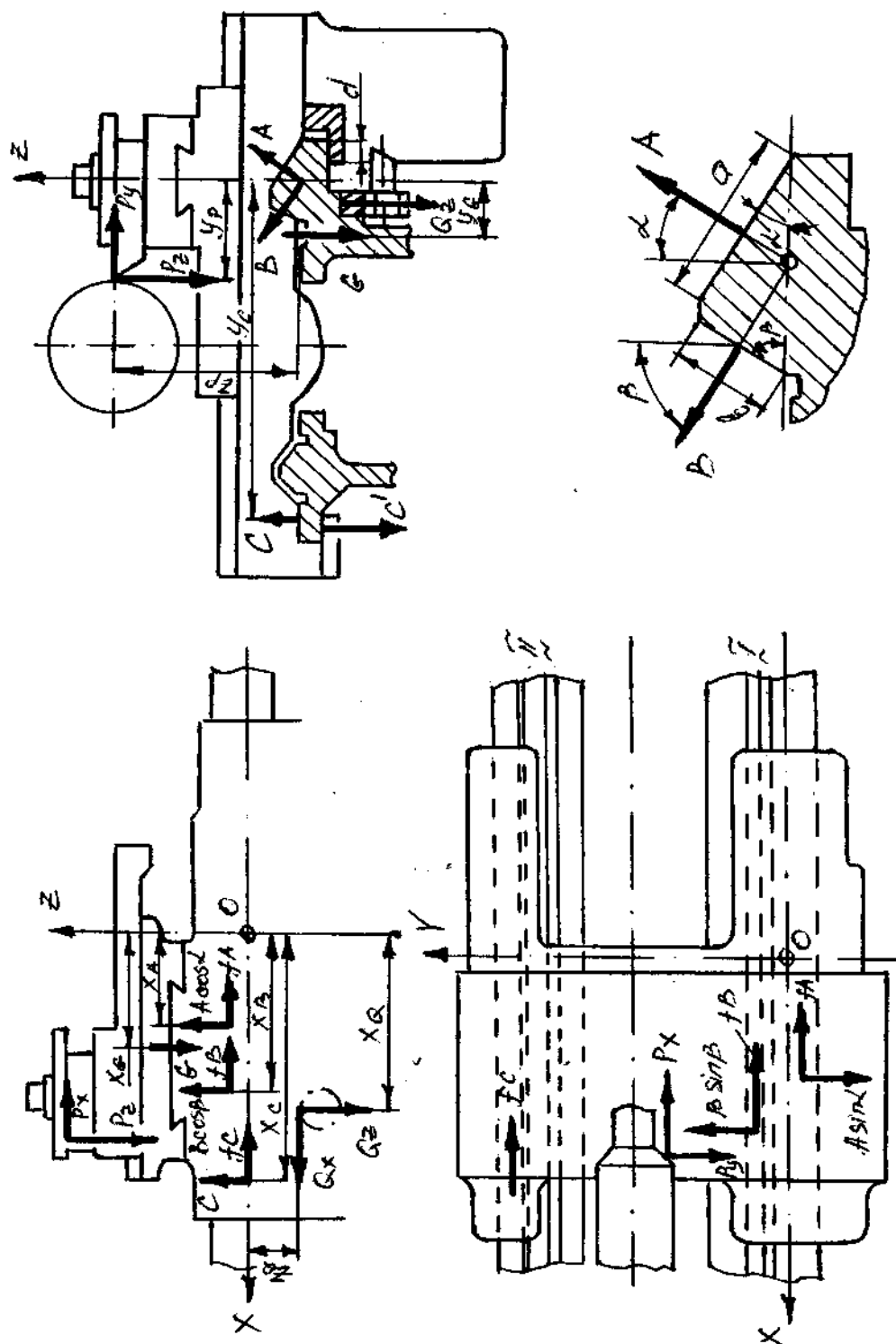


Рисунок 3.26 Схема для розрахунку сил, що діють в направляючих супорта.

$$M_Y^I = A \cdot \cos \alpha \cdot X_A + B \cdot \cos \beta \cdot X_B$$

$$M_Y^{II} = C \cdot X_C$$

Для достатньо жорстких салазок і направляючих, навантажених відносно рівномірно, можна розрахувати, що момент розподіляється між напрямними І і С пропорційно їх ширині тобто:

$$\frac{M_Y^I}{M_Y^{II}} = \frac{l}{C},$$

або

$$M_Y^I = M_Y^B \cdot \frac{l}{l+C}; M_Y^I = M_Y^B \cdot \frac{3}{5}.$$

$$M_Y^{II} = M_Y^B \cdot \frac{l}{l+C}; M_Y^{II} = M_Y^B \cdot \frac{2}{5} \quad ($$

$$M_Y^I = \frac{5}{3} \cdot M_Y^B; M_Y^{II} = \frac{5}{2} \cdot M_Y^B.$$

значення максимального тиску $P_1 = P_{\max}$:

$$P_{\max} = 250 \div 300 (H / \text{см}^2)$$

з рівняння (4):

$$C = \frac{P_Z \cdot Y_P - P_Y \cdot Z_P + G \cdot Y_G}{Y_C} = \frac{2458 \cdot 70 - 1010 \cdot 315 + 1635 \cdot 30}{350} = 277 H$$

з рівняння системи (1) і (2):

$$B = \frac{(Q_x - P_x + C \cdot f) \sin \alpha - P_Y}{\sin \beta - \sin \alpha \cdot f} = \frac{(2877.44 - 1813 + 277 - 01) \cdot \sin 45^\circ - 1010}{\sin 35^\circ - \sin 45^\circ \cdot 0.1} = 472.7 (H)$$

$$A = \frac{P_Y + B \cdot \sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{1010 + 472.7 \cdot \sin 35^\circ}{\sin 45^\circ} = 2136.2 (H)$$

з рівняння (4.19):

$$M_Y^B = -(1813 \cdot 315 - 2458 \cdot 1602 + 2877.44 \cdot 40 - 1635 \cdot 90) = -2.9 \cdot 10^2 H / \text{мм}$$

з рівняння (4.21):

$$M_Y^I = \frac{5}{3} \cdot 2.9 \cdot 10^2 = 4.8 \cdot 10^2 (H \cdot \text{мм})$$

$$M_Y^{II} = \frac{5}{2} \cdot 2.9 \cdot 10^2 = 7.25 \cdot 10^2 (H \cdot \text{мм})$$

з рівняння

$$M_Y^B = C \cdot X_C$$

$$X_C = \frac{M_Y^B}{C} = \frac{7.25 \cdot 10^2}{277} = 2.6 (\text{мм})$$

з рівняння (4.18) та з рівняння (4.20):

$$\begin{cases} B \sin \beta \cdot X_B - A \sin \alpha \cdot X_A = P_Y \cdot X_P - P_X \cdot Y_P - C \cdot f \cdot Y_C \\ B \cos \beta \cdot X_B + A \cos \alpha \cdot X_A = M_Y^I \end{cases}$$

$$X_A = \frac{\sin \beta \cdot M_Y^I}{A \cdot \sin(\alpha + \beta)} = \frac{\sin 35^\circ \cdot 4.8 \cdot 10^2}{2136.2 \cdot \sin(35^\circ + 45^\circ)} = 0.13 (\text{мм})$$

Звідси :

$$X_B = \frac{M_Y^I - A \cos \alpha \cdot X_A}{\cos \beta \cdot B} = \frac{4.8 \cdot 10^2 - 2136.2 \cdot \cos 45^\circ \cdot 0.13}{\cos 35^\circ \cdot 472.7} = 0.73 (\text{мм})$$

Визначаємо епюру питомих тисків в направляючих.

Після прикладання сили супорт змінює своє положення на направляючих, тому що відбувається деформація δ поверхневих шарів спряжених направляючих із плином часу – їх знос U . Тому відбувається зближення спряжених деталей супорта і направляючої станини яке можна характеризувати величинами Δ_1, Δ_2 .

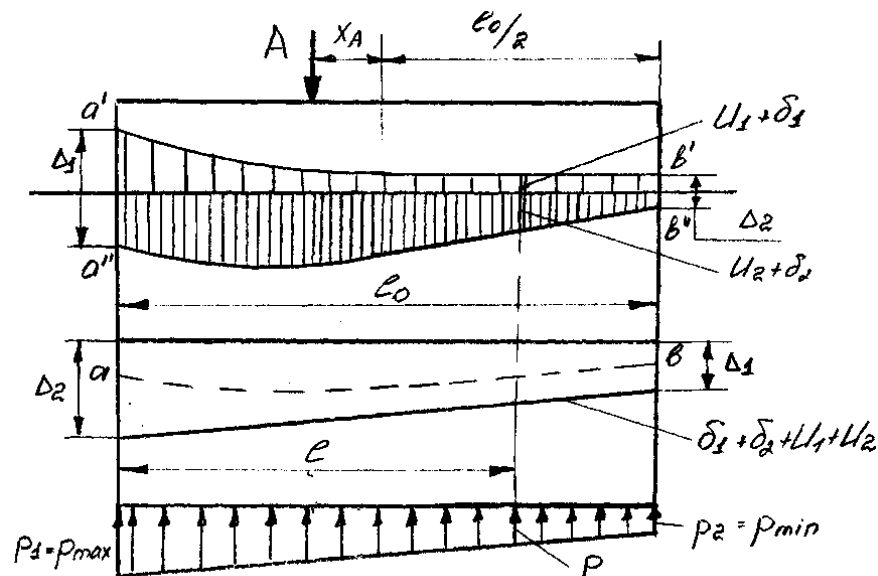


Рисунок 3.2- - Розрахункова схема для визначення епюри питомих тисків по направляючих.

Після суміщення a'' $''$ в з a' $'$ в отримуємо якби взаємне входження деформованого і зношеного об'єму одного тіла в інше. Отримана площа взаємного входження являється трапецією. Проектуємо сили на вертикальну вісь.

$$\frac{P_1 + P_2}{2} \cdot \alpha \cdot l_0 = A.$$

Візьмемо суму моментів відносно середньої точки

$$\frac{1}{2}(P_1 - P_2) \cdot l_0 \cdot \alpha \cdot \frac{l_0}{6} = A \cdot X_A.$$

де a – ширина направляючих Звідси:

Звідси:

$$P_1 = \frac{A}{\alpha \cdot l_0} \cdot \left(1 + 6 \cdot \frac{X_A}{l_0} \right);$$

$$P_2 = \frac{A}{\alpha \cdot l_0} \cdot \left(1 - 6 \cdot \frac{X_A}{l_0} \right);$$

$$X_A < \frac{l_0}{6}$$

Отримуємо повне торкання по довжині направляючих (не розкриття стиску).

Аналогічно для реакцій В і С.

4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуація

4.1 Інструкція по техніці безпеки

Загальні вимоги

1. Дотримуватися усіх загальних правил техніки безпеки при роботі на металорізальному верстаті;
2. Виконувати тільки ту роботу, яка дозволена адміністрацією;
3. Вимагати від майстра, інструктажу по техніці безпеки, звертатись до адміністрації за роз'ясненням , якщо що-небудь незрозуміло.

Перед початком роботи

1. Привести в порядок свій одяг, застигнути рукави, заховати волосся під головний убір (без кінців, що звисають);
2. Прийняти верстат від змінщика, перевірити чи добре прибраний верстат і робоче місце, ознайомитись з неполадками верстату у минулій зміні і прийняти міри по їх усуненню;
3. Про несправність верстату негайно доповісти майстру, до усунення несправності до роботи не приступати.
4. Перевірити наявність і справність:
 - а) огорож, проводів, а також струмоведучих частин електроапаратури;
 - б) справність системи змащення і охолодження;
 - в) справність фіксації органів включення і перемикання;
5. Перевірити якість інструменту при отриманні його зі складу.

При роботі

1. До роботи на верстаті допускаються тільки ті робітники, які добре вивчили верстат, його принцип роботи, техніку керування, правила експлуатації;

2. Надійно закріпити різальний інструмент. Перед встановленням свердла у шпиндель верстату необхідно очистити їх від стружки і масла. Несправні свердла встановлювати на верстат заборонено;
3. Встановлення і зняття свердла проводиться тільки у рукавицях;
4. Надійно закріпити на верстаті оброблювані вироби;
5. При виявленні затупленого свердла або викришуванні пластин твердого сплаву необхідно змінити свердло;
6. Встановлення деталей проводиться при зупиненому свердлі у вільній зоні;
7. Не тримати руки на важелях автоматичного перемикачів верстату;
8. Встановлення заготовок на верстаті, зняття обробленої деталі, а також заміри їх у процесі обробки проводиться на виключеному після повної його зупинки і відводу свердлильної головки у безпечну зону;
9. Не знімати огорожень з верстату;
10. Не переключати важелі швидкостей на ходу верстату;
11. Перед кожним включенням верстату переконатись в тому, що пуск верстату нікому не загрожує небезпекою.
12. Заборонено:
 - чистити, змащувати обладнання під час його роботи;
 - гальмувати рукою частини верстату, які обертаються;
 - допускати на робоче місце людей, що не мають відношення до роботи;
13. Утримувати верстат у чистоті і справності;
14. Під час роботи на холостих ходах перевірити дію кінцевих вимикачів, що обмежують переміщення свердлильної головки в крайніх положеннях і дію аварійних кнопок „Стоп”;

Після закінчення роботи

1. Зупинити верстат і вимкнути електродвигун;

2. Привести в порядок робоче місце:
 - очистити верстат від стружки;
 - різальний і вимірювальний інструмент скласти у відповідне місце і в визначеному порядку;
3. Змастити частини верстату, що труться, тонким шаром масла;
4. Здати верстат змінщику і доповісти майстру про несправності обладнання і про прийняті міри по їх усуненню;
5. Вимити руки теплою водою з милом і передягнутися.

Блокуючи і захисні пристрої, які використовуються у верстаті

Захисні пристрої використовуються для попередження небезпечного контакту робітника з рухомими частинами верстату і різальним інструментом, а також для локалізації небезпечних зон, куди вилітають частинки оброблюваного матеріалу. Захисні пристрої поділяються на три групи: стаціонарні, рухомі і переносні. Верстат забезпечений стаціонарними рухомими пристроями, які знімаються тільки на час ремонту, або при змащуванні і наладці верстату. Також верстат обладнаний рухомими пристроями, кожухами.

Ефективними запобіжними пристроями є різноманітні блокуючі пристрої, які виключають можливість проникнення людини в небезпечну зону або усувають небезпечний фактор.

В верстаті встановлені електричні блокуючі пристрої:

- при спрацюванні захисту від перенавантажень електродвигуна приводу головного руху в процесі обробки деталей або при натисканні кнопки „Стоп шпинделя” спочатку відключається електродвигун приводу переміщення свердлильної головки, а потім з витриманням часу – електродвигун приводу головного руху (здійснюється контактами реле часу);

- виключається можливість роботи електродвигуна переміщення свердлильної головки при відсутності змашування (здійснюється контактами реле тиску);
- виключається можливість одночасного включення електродвигуна приводу переміщення свердлильної головки у взаємо протилежні напрямки (здійснюється контактами магнітного пускача і контактами реле);
- робота електродвигуна приводу насоса охолодження можлива тільки при включеному електродвигуні приводу головного руху і при його роботі в напрямку робочого ходу (здійснюється контактом реле і контактом пускача в ланцюгу живлення котушки пускача).

В верстаті передбачений захист електроприводів в цілях захисту електрообладнання верстата, а також запобігання від поломок різального інструменту і збереження безпечних умов роботи на верстаті.

Електрична схема верстату передбачає ряд електричних захистів:

- 1) Електродвигун приводу головного руху захищений від струмів короткого замикання автоматичним вимкненням, а також від довготривалих недопустимих перевантажень – тепловим реле. Реле максимального струму захищає електродвигун від коротких перевантажень, виключає роботу електродвигуна в двох фазах і запобігає ламанню різального інструменту;
- 2) Електродвигуни приводу переміщення свердлильної головки, оснащенні автоматичними вимикачами, що забезпечують захист від струмів короткого замикання і недопустимих довготривалих перевантажень;
- 3) Всі механічні переміщення вузлів верстата обмежені шляховими вимикачами;
- 4) Наявність кнопки червоного кольору **„Все стоп аварійний”**, дозволяє негайно відключити всі електродвигуни верстату з метою

запобігання нещасних випадків з робітником або пошкодження верстату.

4.2 Організація робочого місця

Для працівників, які беруть участь у технологічному процесі обробки різанням, повинні бути забезпеченні зручні робочі місця. На робочому місці повинна бути забезпечена площа, на якій будуть розміщатися: стелажі, тара, столи та інші пристрої для розміщення оснастки, матеріалів, заготовок, напівфабрикатів, готових деталей і відходів виробництва.

На кожному місці біля верстата на підлозі повинні бути дерев'яні решітки на всю довжину робочої зони, а по ширині на менше 0,6 м від виступаючих частин верстата.

Розміщення обладнання повинно відповідати нормам технологічного проектування механічних цехів. Згідно цих норм, відстань між верстатами призначена для проходу робітників або переміщення матеріалів повинна бути не менше 1 м. Верстати не повинні встановлюватися в притул до стін, колон та інших верстатів. Розрив між ними для наладки, змащування і ремонту повинен бути не менше 500 мм.

Особливістю організації робочого місця на даному верстаті є те, що обробляються деталі великої маси і тому встановлено пристрої для завантаження і розвантаження.

Для нормальної роботи на робочому місці необхідно забезпечити певне значення освітленості. При використанні газорозрядних ламп:

- 1) Розряд зорової роботи *IIв*;
- 2) Освітленість при комбінованому освітлені:
 - загальна 200 лк;
 - загальна і місцева 2000 лк.

Попереднє і штучне освітлення виробничих приміщень повинно відповідати вимогам.

4.3 Оцінка стійкості роботи промислового підприємства до впливу уражаючих факторів ядерної зброї

Однією з основних задач цивільної оборони є проведення міроприємств, направлених на підвищення стійкості роботи об'єкта при радіомагнітних аваріях, катастрофах та стихійних лихах.

Під стійкістю роботи промислового об'єкта розуміють здатність його в екстремальних умовах випускати продукцію в запланованому об'ємі і номенклатурі, а при отриманні слабких чи середніх руйнувань, чи порушення зв'язку кооперацій і поставках відтворювати виробництво в мінімальні строки.

Під стійкістю роботи об'єктів, що безпосередньо не виробляють матеріальних цінностей, розуміють здатність їх виконувати свої функції при настанні екстремальних умов.

На стійкість роботи об'єктів впливають різноманітні фактори, серед яких:

- надійність захисту працівників при катастрофах, аваріях, стихійних лихах;
- здатність інженерно-технічного комплексу об'єкту протистояти радіаційному, світловому випромінюванню та інше;
- захищеність об'єкту від вторинних уражаючих факторів (пожеж, вибухів, затоплень);
- надійність системи постачання об'єкту всім необхідним для виробництва продукції (сировиною, паливом, комплектуючими виробами, електроенергією, водою, газом і інше);
- підготовленість об'єкту до ведення рятувальних робіт і робіт по відновленню порушеного виробництва.

Перераховані фактори визначають собою шляхи підвищення стійкості об'єкта в екстремальних умовах, а саме:

- забезпечення надійного захисту робітників та службовців;

- захист основних виробничих фондів від уражаючих факторів;
- підвищення надійності та оперативності управління виробництвом;
- підготовка до відновлення порушеного виробництва.

В наш час, однією із можливих причин порушення нормальної роботи підприємства є різноманітні аварії, пов'язані з викидом радіоактивних речовин (наприклад: аварії на атомних електростанціях) у навколишнє середовище.

Радіоактивними називаються випромінювання, що виникли при радіоактивному розпаді ядер атомів. Основними такими радіовипромінюваннями є: α , β , γ і нейтронне випромінювання. Їх загальною властивістю є здатність іонізувати атоми і молекули речовин, в які вони проникають. Надійним захистом від α – частин є при зовнішньому опроміненні одяг людини. β – частини майже повністю поглинаються автомобільним чи віконним склом і металічними екранами товщиною в декілька міліметрів. γ – випромінювання володіє великою проникною здатністю і є найважливішим фактором проникаючої дії радіоактивних випромінювань. Нейтронне випромінювання має дуже сильну уражаючу дію при зовнішньому опроміненні.

Суть процесу іонізації заключається в тому, що під дією радіоактивного випромінювання електрично нейтральні в нормальних умовах атоми, молекули речовин розпадаються на пари позитивно і негативно заряджених частинок-атомів. Іонізація речовин супроводжується зміною її основних фізико-хімічних властивостей, а для біологічної тканини – порушенням її життєдіяльності. І те, і інше при визначених умовах може порушити роботу окремих елементів, пристроїв, систем виробничого обладнання, а також викликати ураження персоналу, що в кінцевому випадку, вплине на діяльність підприємства.

Основним параметром, що характеризує уражаючу дію ядерних випромінювань, є поглинена доза радіації (доза опромінення). Доза радіації D

- кількість енергії радіоактивних випромінювань, поглинена одиницею маси опроміненої речовини. Одиницею дози радіації є джоуль на кілограм (**Дж/кг**). Несистемна одиниця дози випромінювання – рад. Для виміру дози використовується несистемна одиниця – рентген (**Р**). Співвідношення одиниць **1рад $\approx$ 1,14Р**.

В зв'язку з тим, що окремі види випромінювання володіють різкою біологічною ефективністю, введемо поняття „біологічної дози”. Одиниця її **бер** (біологічний еквівалент рентгена) – не доза випромінювання (будь-якого виду), дія якого на живий організм еквівалентна дії **1Р γ** – випромінювання.

Радіоактивне випромінювання, що утворюється безпосередньо при вибуху, називається проникаючою радіацією. Джерелом проникаючої радіації є ланцюгова реакція і розпад радіоактивних продуктів, що утворилися в результаті ядерної реакції. Час дії проникаючої радіації не перевищує 10-15с з моменту вибуху.

В залежності від одержаної організмом людини дози опромінення, розділяють 4 ступені променевої хвороби:

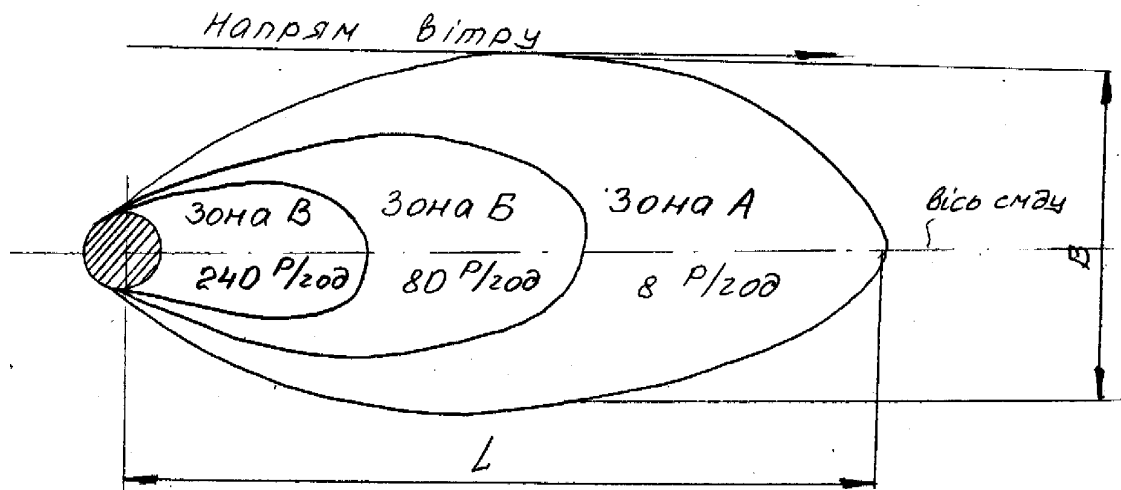
- легка-доза радіації 100...200 Р; без смертельних випадків;
- середня-доза радіації 200...300 Р; в результаті ускладнень смертність 20%;
- важка-доза радіації 300...600 Р; в важких випадках смерть настає через 10-36 діб; смертність до 50%;
- вкрай важка-доза радіації більше 600 Р; смерть в 100% уражених через 5-10 діб.

Захистом від проникаючої радіації служать перешкоди і укриття з різних матеріалів, що ослаблюють потік γ – променів і нейтронів. Радіоактивне зараження – це зараження поверхні землі, атмосфери, водних просторів і різних предметів радіоактивними речовинами. Джерелами радіоактивного зараження є: продукти ланцюгової ядерної реакції ділення;

частина ядерного заряду; наведена радіоактивність в ґрунті під дією нейтронів.

Масштаби і степінь радіоактивного зараження місцевості залежить від потужності вибуху, метеорологічних умов, рельєфу місцевості, типу ґрунту і рослинності. Частина радіоактивних речовин опадає на поверхню землі в районі вибуху, а решта (більша частина) випадають по мірі посування хмари, утворюючи на поверхні так званий радіоактивний слід, який характеризується довжиною L і шириною B .

На відкритій рівнинній місцевості при незмінному напрямку вітру на всіх висотах слід має форму витягнутого еліпса.



А – зона помірного зараження;

Б – зона сильного зараження;

В – зона небезпечного зараження.

По степені небезпеки для людей і тварин на сліді хмари виділяють декілька зон радіоактивного зараження.

Зони радіоактивного зараження характеризуються наступними параметрами:

- зона помірного зараження (**зона А**) – доза опромінення на час повного розпаду радіоактивних речовин в межах зони 40...400Р. На частку цієї зони приводиться 78-80% площі всього радіоактивного сліду;

- зона сильного зараження (**зона Б**) – доза опромінення на час повного розпаду 400...1200Р. Ця зона займає 10-12% площі радіоактивного сліду;
- зона небезпечного зараження (**зона В**) – доза опромінення на час повного розпаду в зоні 1200Р і більше. На частку цієї зони доводиться 8-10% площі радіоактивного сліду.

Характерною особливістю радіоактивного зараження є спад рівня радіації на різний час після вибуху, розраховані за відповідною методикою.

Після вибуху, год	0,5	1	2	3	4	5	6	7	10	12	24	48
Остаточний рівень радіації, %	240	100	44	27	19	15	12	10	7	5	2	1

На відміну від проникаючої радіації, що діє на протязі декількох секунд, γ – випромінювання на місцевості, зараженій радіоактивними речовинами, діє на організм більш тривалий час, практично до тих пір, поки люди не будуть виведені з зараженого району або розміщені в захисних спорудах.

Доза радіації одержана людиною для відкритої місцевості може бути визначена за формулою:

$$D = P_{cp} \cdot t,$$

де P_{cp} – середній рівень радіації за час опромінення, Р/год;

$$P_{cp} = (P_n + P_k) / 2$$

де P_n і P_k – рівні радіації на початку і в кінці перебування на зараженій території;

t – час перебування на зараженій території.

Радіаційне ураження людей залежить не тільки від дози опромінення, але й від часу, на протязі якого одержана ця доза. Для захисту від радіоактивного ураження використовуються сховища і укриття, будівлі і

спороди, що послаблюють γ – промені і захищають від зараженого повітря. Захист від радіаційного зараження людей може бути забезпечений за допомогою засобів індивідуального захисту (протигаза, респіратори, захисний одяг).

За критерії стійкості роботи об'єкта народного господарства в цьому випадку приймається допустима доза радіації, яку можуть отримати робітники і службовці за час роботи зміни в конкретних умовах.

Оцінка стійкості об'єкту при дії проникаючої радіації проводиться в такій послідовності:

1. Визначається степінь захищеності робітників та службовців – коефіцієнт ослаблення дози радіації $K_{осл}$ кожної будівлі, в якій буде працювати виробничий персонал. Значення $K_{осл}$ для основних типів будівель, транспортних засобів розраховані і приведені в довідниках.

Коефіцієнт ослаблення укриття залежить від його типу і розраховується по формулі:

$$K_{осл} = K_p \cdot \prod_{i=1}^n 2^{hi/di},$$

де n – число захисних шарів матеріалів перекриття сховища;

hi – товщина i -того захисного шару, см;

di – товщина шару половинного ослаблення матеріалу i -того захисного шару, см;

K_p – коефіцієнт, що враховує умови розміщення сховища.

2. Визначаються дози радіації, які може отримати виробничий персонал при дії проникаючої радіації і радіоактивного зараження.

Доза радіації визначається за формулою:

$$D = D_{откр} / K_{осл},$$

де $D_{откр}$ – доза радіації, яку може отримати людина на відкритій місцевості.

3. Визначається граничне значення рівня радіації **Р/год**, на об'єкті, до якого можлива виробнича діяльність в звичайному режимі:

$$P_{\text{lim}} = \frac{D_{\text{уст}} \cdot K_{\text{осл}}}{5(t_n^{-0.2} - t_k^{-0.2})},$$

де $D_{\text{уст}}$ – допустима (встановлена) доза опромінення для працівників зміни з врахуванням можливого радіаційного опромінення в заміській зоні і при переїзді на об'єкт з таким розрахунком, щоб сумарна доза опромінення не перевищувала допустимої норми однократного опромінення (**50Р**).

4. Встановлюється наявність на об'єкті матеріалів, пристроїв, апаратури, чуттєвої до дії радіації і ступінь їх можливого пошкодження при очікуваній дозі опромінення.
5. Оцінюється степінь і можливість герметизації виробничих приміщень з метою виключення чи зменшення проникнення в них радіоактивного пилу.

Під режимом радіаційного захисту робітників і службовців, виробничої діяльності об'єкту в умовах радіоактивного зараження потрібно розуміти встановлений режим роботи, пересування і відпочинку працюючих змін з використанням засобів захисту, який виключає радіаційне зараження людей і скорочує вимушену зупинку виробництва.

Оскільки умови роботи об'єктів можуть бути різні, то режими роботи повинні розраховуватися індивідуально для кожного об'єкту, якщо це допускається по технологічних умовах виробництва.

Зведена таблиця режимів роботи цеху (об'єкту) для різних рівнів радіації є складовою частиною документів по управлінню робочим виробничим процесом.

Для прийняття рішення про введення в дію визначеного режиму роботи необхідно заміряти рівень радіації на території об'єкту і перерахувати його на 1 год після вибуху по формулі:

$$P_1 = P_{\text{сум}} \cdot K_{\text{пер}},$$

де $P_{\text{сум}}$ – виміряний рівень радіації на час $t_{\text{сум}}$ від моменту вибуху;

$K_{\text{пер}}$ – коефіцієнт перерахунку, виміряного рівня радіації на 1 год після вибуху.

Висновки

В кваліфікаційній роботі розглянуто варіанти схем формоутворення поверхонь деталі представника за умови їх обробки на токарному верстаті, проведено оптимізацію компоновочної схеми токарного верстата з можливістю обробки поверхонь які містять елементи сфери, розроблено структурно кінематичну схему верстата, внесено зміни до кінематичної схеми верстата які дають можливість додаткового руху різального інструменту, розроблено удосконалену конструкцію каретки з додатковою можливістю провороту від черв'ячної передачі. Проведено розрахунок напрямних, передачі гвинт-гайка ковзання та шпиндельного вузла верстату.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. 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).
2. Бочков В. М., Сілін Р. І., Гаврильченко О. В. Металорізальні верстати : навч. посіб.: Львів Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2009. 268 с.
3. Бочков В.М., Сілін Р.І., Гаврильченко О.В. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів: підручник. Львів: Бескд Бі, 2008. 448 с.
4. Гейчук В.М. Функціональне проектування верстатів, роботів та машин в Autodesk Inventor (Частина І): навч. посіб. Навчальне мережне електронне видання. К.: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2017. 394 с.
5. Голінько В. І. Охорона праці : підручник. Київ : Алерта, 2014. 264 с.
6. Данильченко Ю.М., Шевченко О.В., Ковальов В.А., Волошин В.Н. Металообробне обладнання. Кінематичний аналіз металорізальних верстатів: навч. посіб.: К.: НТУУ «КПІ», 2007. 60 с.
7. Жидецький В.Ц., Джигирей В.С., Мельников О.В. Основи охорони праці: навчальний посібник.: Львів: Афіша, 2000. 350 с.
8. Залога В. О. Розрахунок режимів різання при точінні, свердлінні, фрезеруванні : навчальний посібник. Київ : ІСІ, 1994. 176 с.
9. Запорожець О. І., Протоєрейський О. С., Франчук Г. М., Боровик І. М. Основи охорони праці : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2009. 264 с.

10. Кваліфікаційна робота магістра: структура, вимоги до виконання та захист. Методичні рекомендації для здобувачів другого (магістерського) 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.: В. Р. Кобельник, В. В. Крупа, Р. Я. Лещук, А. А. Сеник, Р. А. Склярів, В. В. Шанайда, А. В. Гагалюк, В. М. Буховець. – Тернопіль : ТНТУ, 2023. 66 с.
11. Кобельник В. Р. Підвищення ефективності процесу свердління наскрізних отворів регулюванням подачі : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01. Тернопіль : [б. в.], 2013. 21 с.с
12. Кобельник В.Р., Кривий П.Д. Жорсткість вертикально-свердлильних верстатів. *Вісник ЖДТУ. Технічні науки.* : Житомир : ЖДТУ, 2007. Вип. № 1 (40). С. 34–40.
13. Кобельник В.Р, Кривий П.Д. Методика дослідження кінематичної точності механізму подач вертикально-свердлильних верстатів на прикладі верстата моделі 2Н118. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. праць.* : Житомир : ЖДТУ, 2010. Вип. 8. С. 99–108.
14. 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.
15. Кобельник В.Р. Ефективність керованого процесу свердління наскрізних отворів шляхом забезпечення зміни подачі. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць.*: Краматорськ, 2012. – Вип. № 31. С. 47–56.
16. Кобельник В.Р. Підвищення ефективності процесу свердління наскрізних отворів регулюванням подачі: дис. канд. техн. наук: 05.03.01: /

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

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

18. Кривий П. Д., Кобельник В. Р., Кузьмін М.І. Про характер зміни подачі при виході інструменту із тіла заготовки в процесі свердління наскрізних отворів. *Вісник ТНТУ : Науковий журнал.*: Тернопіль : ТНТУ, 2012. № 4 (68). С. 114–127.

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

20. Кривий П.Д., Тимошенко Н.М., Дзюра В.О., Кобельник В.Р. Уточнений метод апіорно-емпіричних функцій визначення закону розподілу та його характеристик на основі малої вибірки. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, 14-15 травня 2020 року.*: ТНТУ, 2020. С. 132–133.

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

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

23. 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.
24. Кухарський О. М., Кушак І. В. Методичні вказівки для виконання курсового проекту з предмету: «Технологія машинобудування». Тернопіль, 2001. 280 с.
25. Мазур М. П. та ін. Основи теорії різання матеріалів. Львів : Новий Світ–2000, 2010.
26. Мархель І. І. Деталі машин : навчальний посібник. Київ : Алерта, 2005. 368 с.
27. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунків деталей машин. К.: «Вища школа», 1993. 560 с.
28. Паливода Ю.Є., Дячун А.Є., Лещук Р.Я. Інструментальні матеріали, режими різання і технічне нормування механічної обробки: навчальний посібник.: Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2019. 240 с.
29. Равська Н. С. та ін. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці: навчальний посібник.: Житомир: ЖІТІ, 2000. 332 с.
30. Розрахунок та конструювання коробок швидкостей металорізальних верстатів. Методичні вказівки до виконання практичних та розрахунково-графічних робіт : Чернігів: ЧНТУ, 2016. 111 с.
31. Скляр Р. А., Шанайда В. В., Савчук М. А. Дослідження перехідних процесів електропривода металорізального верстата з використанням інформаційних технологій. Вісник ТНТУ. 2011. Том 16. № 1. С.117-125.
32. Шанайда В.В. Пакет MathCAD в інженерних розрахунках. Тернопіль : Вид-во ТДТУ, 2001.