

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

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)

Кафедра конструювання верстатів, інструментів та машин
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: «Розробка конструкції спеціального шліфувального верстату та моделювання точності обробки циліндричної поверхні на ньому»

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МВм-61
спеціальності _____

133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва спеціальності)

(підпис) Приходай Д.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник _____
(підпис) Скляр Р.А.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____
(підпис) Ярема І.Т.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____
(підпис) Кобельник В.Р.
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(підпис) Золотий Р.З.
(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2021

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
Кобельник В.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва спеціальності)
студенту Приходай Денис Андорійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розробка конструкції спеціального шліфувального верстату та моделювання точності обробки циліндричної поверхні на ньому»

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

Затверджені наказом ректора від «24» вересня 2021 року № 4/7-788

2. Термін подання студентом завершеної роботи 16.12.2021

3. Вихідні дані до роботи креслення та технологічний процес виготовлення деталі «Шестерня МБК34М4568», паспорт базового верстату

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити) *Аналітичний розділ. Огляд та аналіз проблематики дипломної роботи. Інформаційно-патентний пошук. Постановка мети та задач дослідження. Технологічні розрахунки. Розробка структурно-кінематичної схеми верстата. Оптимізація компоувальної схеми верстату. Силові та міцнісні розрахунки. Науково-дослідна частина. Заходи з охорони праці та безпеки в НС.*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів) *Мета та завдання дослідження - 1 арк. ф.А1; Інформаційно-патентний пошук – 2 арк. ф.А1; Аналіз схем формоутворення 1 арк. ф.А1; Бабка передня – 1 арк.ф.А1; Бабка шліфувальна – 1 арк.ф.А1; Результати наукових досліджень – 3 арк. ф.А1.*

Анотація

Розробка конструкції спеціального шліфувального верстату та моделювання точності обробки циліндричної поверхні на ньому // Дипломна робота магістра. Приходай Денис Андрійович. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет інженерії машин, споруд та технологій, кафедра конструювання верстатів інструментів та машин, група МВм-61.: ТНТУ, 2021.

Ключові слова: точність, спеціальний шліфувальний верстат, математична модель, системний підхід, теорія графів.

Метою роботи є розробка конструкції спеціального шліфувального верстату для обробки торцевої циліндричної поверхні.

В кваліфікаційній роботі магістра здійснено інформаційно-патентні дослідження стосовно конструкцій та компоновальних схем шліфувальних верстатів для обробки циліндричних поверхонь. Розроблено технологічний процес виготовлення деталі «Шестерня МБК34М4568». Проведено конструктивні розрахунки основних виконавчих вузлів шліфувального верстату. На основі теорії графів здійснено представлення спеціального шліфувального верстату як системи. Для спроектованого верстату проведено моделювання точності формоутворюючої системи. В роботі знайшли висвітлення питання охорони праці та безпеки життєдіяльності людини стосовно тематики роботи.

Annotation

Prykhodai D.A. Development of a single-purpose grinding machine design and accuracy modeling of cylindric surface machining on it. Thesis work for obtaining the educational qualification of Master degree of specialty 133 - Industrial machinery engineering; Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University; Ternopil, 2021.

Key words: accuracy, special grinder, mathematical model, system approach, graph theory.

The purpose of the thesis is to develop the design of a special grinding machine for finishing the end cylindrical surface.

In this master's thesis the information-patent researches concerning designs and layout schemes of grinding machines for processing of cylindrical surfaces are carried out.

The technological process of manufacturing the part "Gear MBK34M4568" has been developed. Constructive calculations of the main executive units of the grinding machine are carried out. Based on the theory of graphs, a special grinding machine is presented as a system. The accuracy of the forming system is modeled for the designed machine.

Thesis work includes issues related to the industrial safety and the safety of human life.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ПРИЙНЯТІ СКОРОЧЕННЯ..... | 8 |
| ВСТУП..... | 9 |
| РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ..... | 11 |
| 1.1. Огляд та аналіз проблематики кваліфікаційної роботи | 11 |
| 1.2. Інформаційно-патентний пошук | 12 |
| 1.2.1. Системний підхід до представлення шліфувального верстату як складної технічної системи | 12 |
| 1.2.2. Аналіз робіт в області проектування верстатів..... | 15 |
| 1.2.3. Патенті дослідження..... | 18 |
| 1.3. Висновки по розділу, постановка мети та задач дослідження | 25 |
| РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДНО-ПРОЕКТНИЙ..... | 27 |
| 2.1. Технологічні розрахунки..... | 27 |
| 2.2. Розробка структурно-кінематичної схеми верстату | 32 |
| 2.3. Оптимізація компонуванняльної схеми верстату | 35 |
| 2.4. Кінематичний розрахунок верстату | 38 |
| 2.5. Вибір потужності і типів двигунів для приводів верстату | 42 |
| 2.6. Розрахунок шпindelного вузла..... | 44 |
| 2.7. Автоматизований розрахунок клинопасових передач приводу | 48 |
| 2.8. Висновки по розділу | 51 |
| РОЗДІЛ 3 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА..... | 52 |
| 3.1. Методика та план проведення наукових досліджень | 52 |
| 3.2. Представлення шліфувального верстату як системи | 52 |
| 3.3. Використання методу морфологічного аналізу для розробки компонувань шліфувального верстату..... | 60 |
| 3.4. Моделювання точності обробки циліндричної поверхні на спеціальному шліфувальному верстаті | 63 |
| 3.4.1. Рівняння оброблюваної поверхні у формоутворюючому вигляді ... | 63 |
| 3.4.2. Векторний баланс точності в нормальному напрямку..... | 65 |
| 3.4.3. Рівняння середньоквадратичної базової циліндричної поверхні..... | 69 |

| | |
|---|----|
| 3.5. Обговорення та аналіз отриманих результатів* (*опубліковані результати досліджень подані в додатках) | 74 |
| 3.6. Висновки до розділу | 74 |
| РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ..... | 75 |
| 4.1. Пил як один з найшкідливіших факторів виробничого середовища.. | 75 |
| 4.2. Конструкція пилевідсмоктувального приладу для видалення абразивного пилу із зони різання верстату, що проектується | 77 |
| 4.3. Організація ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій | 80 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 82 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ | 84 |
| ДОДАТКИ..... | 89 |

ПРИЙНЯТІ СКОРОЧЕННЯ

ДКНС – Державна комісія з надзвичайних ситуацій;

ДПС – двигун постійного струму;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

МОР – мастильно-охолоджувальна рідина;

МПК – міжнародна патентна класифікація;

НС – надзвичайна ситуація;

ТП – технологічний процес;

ТС – технічна система;

ФУСВ – формоутворююча система верстата;

ЧПК – числове програмне керування;

ШВ – шпиндельний вузол.

ВСТУП

Аналіз трудомісткості обробки в окремих галузях промисловості показав, що процеси абразивного шліфування в середньому можуть становити від 25% до 30%, а в деяких галузі машинобудування можуть доходити і до 50% [10].

Сучасна техніка передбачає використання виробів які відповідають вимогам надійності та довговічності, які в свою чергу залежать від якості їх виготовлення. Досить часто такі деталі при їх виготовленні потребують застосування чистових та оздоблюваних методів обробки. Торцеве шліфування вважають одним із найпоширеніших методів обробки відповідальних деталей. Саме на фінішних операціях обробки формуються параметри точності та якості деталей.

Для збільшення точності, якості та продуктивності обробки деталей з торцевими циліндричними поверхнями необхідно мати математичні моделі, які дозволять здійснити наукове обґрунтування управлінням процесом їх обробки.

Тема «Розробка конструкції спеціального шліфувального верстату та моделювання точності обробки циліндричної поверхні на ньому» є актуальною.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка конструкції шліфувального верстату для обробки торцевої циліндричної поверхні.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких основних задач:

- у відповідності до тематики роботи провести інформаційно-патентні дослідження;
- здійснити необхідні технологічні розрахунки для деталі «Шестерня МБК34М4568»;
- здійснити проектування основних виконавчих вузлів проектного верстату;
- здійснити моделювання точності обробки циліндричної поверхні на запропонованому верстаті;
- запропонувати комплекс заходів з охорони праці та безпеки життєдіяльності людини у відповідності до тематики роботи.

Об'єкт дослідження – спеціальний шліфувальний верстат для обробки циліндричної торцевої поверхні.

Предмет дослідження – формоутворююча система шліфувального верстату.

Методи дослідження. В роботі застосовано методи системного підходу, які дозволили представити шліфувальний верстат як одне ціле. Проведені дослідження опираються на положення векторної математики та теорії структурних матриць, теорію графів.

Структура і обсяг роботи. Дипломний проект складається із вступу, чотирьох розділів і основних висновків, які розміщені на 88 сторінках, 41 рисунку та 7 таблиць на 24 сторінках, списку літературних джерел з 50 найменувань на 5 сторінках, додатків на 18 сторінках, всього 106 сторінок.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІТИЧНИЙ

1.1. Огляд та аналіз проблематики кваліфікаційної роботи

Поява нових інструментальних матеріалів та вдосконалення існуючих способів абразивного шліфування підвищує якість та точність обробки деталей. Якщо порівняти шліфування та лезову обробку деталей, то перша є більш точною та продуктивною. Деталі що містять високоточні робочі торцеві поверхні входять до складу великої кількості сучасних конструкцій машин, їх вузлів та механізмів. Іншим важливим фактором який впливає на точність та якість оброблюваних деталей є власне точність верстатного обладнання [42].

В своїй роботі ми будемо розглядати особливості проектування шліфувального верстату який буде обробляти торцеві циліндричні поверхні.

Торцеве шліфування супроводжується нерівномірністю зношування шліфувального круга. Основний шар матеріалу зрізується ділянкою круга, яка є прилеглою до периферії. Ділянка яка знаходиться ближче до центру круга менше зношується, при цьому периферійна ділянка круга зношується швидше з утворенням на ній заборного конуса. В процесі обробки навантаження між різними ділянками кола вирівнюється [10].

Надзвичайно важливим є статичне налаштування верстату, яке визначає ефективність процесу торцевого циліндричного шліфування. Таке налаштування передбачає встановлення шліфувальних кругів під певним кутом до поверхні подачі виробів.

Для того щоб підвищити продуктивність обробки та краще використати ріжучі властивості робочої поверхні круга слід передбачити на верстаті можливість його повороту на певний кут, який розраховується з врахуванням перекриття припуску, що знімається. Саме тому проєктований верстат оснащується системою ЧПК.

Для того щоб розробити перспективну конструкцію шліфувального верстату для обробки торцевої поверхні циліндричної деталі необхідно провести

патентно-інформаційні дослідження існуючих конструкцій та компоновань верстатів, а також способів обробки таких деталей. Також необхідно розглянути теоретичні передумови створення шліфувальних верстатів для обробки циліндричних поверхонь на основі системного підходу. Опираючись на проведені дослідження буде здійснено проектування основних виконавчих вузлів верстату. Також слід розглянути питання розробки моделі точності для запропонованого верстату.

1.2. Інформаційно-патентний пошук

1.2.1. Системний підхід до представлення шліфувального верстату як складної технічної системи

Шліфувальні верстати відносяться до складних технічних систем (ТС), до їх складу входять певні системи, які пов'язані між собою енергетичними, інформаційними та матеріальними потоками (рис. 1.1). При їх проектуванні слід враховувати процеси різної природи, які супроводжують процес обробки [17].

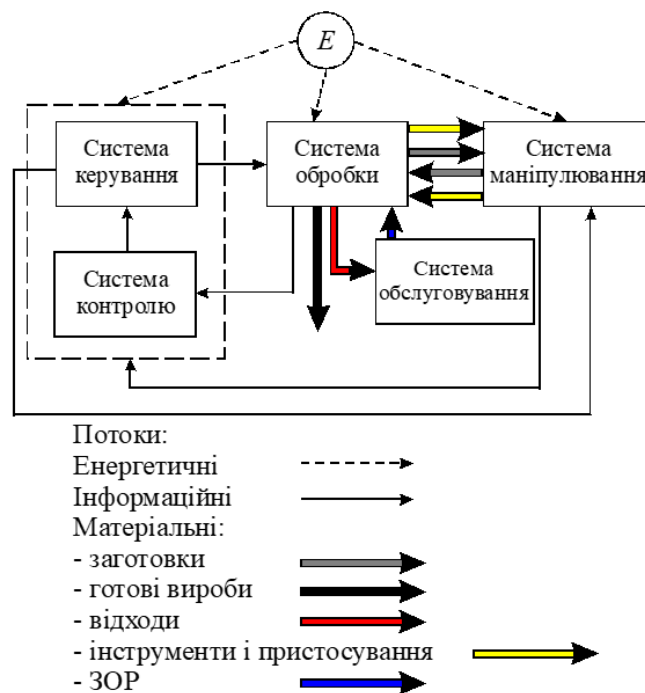


Рис. 1.1. Структурно-функціональна модель верстат як складної ТС

Системний підхід при проектуванні дозволяє знайти оптимальні конструктивні та компоновальні рішення верстатів [44, 1, 5]. Його використання

дозволяє відобразити в проєктованій конструкції сукупність вимог та способів дій, які враховують сучасний рівень наукового пізнання, психологію мислення, досвід попередніх поколінь, а також ефективно використовувати елементи теорії систем [35, 25, 9].

При проєктуванні шліфувального верстату ефективним є використання багатоцільового підходу до створення об'єктів нової техніки, а також технології та технологічного оснащення [17]. Основні етапи цього підходу приведені на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Багатоцільовий підхід до проєктування ТС

Процес створення складних ТС (до яких відносяться шліфувальні верстати) передбачає проведення ряду етапів, а саме поступовий перехід від ідеї до її реалізації через серійну продукцію. В процесі проєктування слід здійснити обґрунтування необхідності створення, провести комплекс науково-технічних досліджень, здійснити власне конструювання верстату. Після цього потрібно виготовити дослідні та промислові взірці та перейти до виготовлення серійної продукції.

Дуже важливо на початковому етапі проєктування здійснити обґрунтування необхідності створення. При його проведенні необхідно

врахувати існуючі потреби та можливість зміни технології в майбутньому. Якщо дане питання буде недостатньо опрацьоване, то це може призвести до того, що на момент початку випуску продукції потреба в ній може зникнути.

Саме тому надзвичайно важливим етапом є науково-технічне дослідження, яке передбачає цілий ряд наукових процедур (рис. 1.3). Питання які розв'язуються на даному етапі залежать від виду, призначення, умов роботи, а також специфічних особливостей експлуатації, степені вивченості ТС.



Рис. 1.3. Етапи, які передбачені в рамках науково-технічного дослідження

Провідні фірми які займаються проектуванням та виготовленням верстатів використовують прогресивне конструювання машин, в результаті якого здійснюється розробка конструкторської документації для виготовлення машин. Конструювання передбачає на попередньому етапі розробку технічних пропозицій, а потім безпосередньо ескізне проектування, макетування, технічне проектування. Вказана послідовність дозволяє обрати один із можливих варіантів побудови верстата із числа можливих альтернатив. Після цього здійснюється детальна проробка обраного варіанту (здійснюється ескізне проектування та макетування), готується технічна документація на дослідне і серійне виробництво (технічне проектування) [17].

В роботі [43] розглянуто стратегію використання системного підходу при здійсненні автоматизації проектування для токарних верстатів. Даний підхід можна з успіхом використовувати при проектуванні шліфувальних верстатів.

При проектуванні верстатів надзвичайно важливо приділити увагу питанням точності. Так в роботі [12] вирішені питання використання методу ітерацій для дослідження точності подач металорізальних верстатів.

1.2.2. Аналіз робіт в області проектування верстатів

Провідні науковці в галузі конструювання металорізальних верстатів вважають, що апарат системного аналізу є найбільш застосовуваним методом для дослідження і розробки структури верстату. Ґрунтовні дослідження в даному напрямку проводили Бушуєв В. В. [5], Проніков А. С. [39], Кузнецов Ю.М [15].

В роботах опублікованих Ю. М. Кузнецовим багато уваги приділяється використанні системного підходу при проектуванні металорізальних верстатів з використанням методу морфологічного аналізу та синтезу [15]. Перевагою даного методу є багатоваріантність пропонованих рішень, до недоліків слід віднести те, що він важко піддається формалізації.

Цікавою є робота А.І. Левіна [14], в якій він виділяє три типи моделей, які дозволяють описати верстат будь-якого типу (рис. 1.4). Також в його праці розкрито зміст основних принципів автоматизації проектування (принципу композиції та принципу подібності).



Рис. 1.4. Суть моделей опису металорізальних верстатів

Великий внесок в розвиток автоматизації проектування металорізальних верстатів здійснив Г.М. Васильєв, який розробив модель оптимального конструювання верстатних вузлів як функції ефективності та якості [6]. В його роботі представлено методологію дворівневої оптимізації варіантного конструювання. Запропонований ним підхід передбачає використання блочно-модульного принципу проектування верстатів та верстатних систем. При якому можуть використовуватися уніфіковані вузли та модулі. Даний метод можна використовувати разом із методом морфологічного аналізу (при описі наборів варіантів конструкцій функціоналами якості).

Заслужують на увагу роботи В. Т. Портмана [37, 38], в яких автор пропонує математичний апарат, за допомогою якого можна здійснити оцінку точності металорізальних верстатів на основі аналізу процесу формоутворення, а також пропонує модель формоутворюючої частини верстату яка враховує варіації взаємного розташування його виконавчих органів.

Цікавою є робота в якій здійснено перехід від опису формоутворюючої системи верстату до опису його динамічної системи. Автор запропонував математичну модель, яка дозволяє представити верстат як технологічну машину у вигляді функції формоутворення [18].

При проектуванні різних типів металорізальних верстатів з використанням CAD/CAM ідеології [49], доцільно застосувати моделі трьох типів (рис. 1.5).

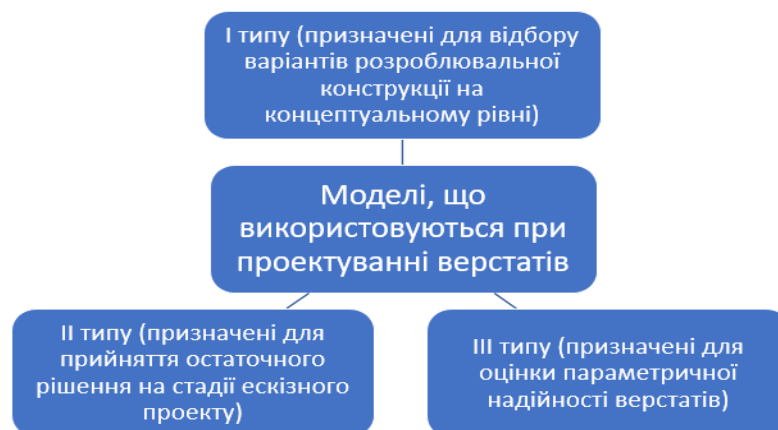


Рис. 1.5. Типи моделей які використовуються при проектуванні металорізальних верстатів

Моделі I типу застосовуються для відбору варіантів конструкції верстату на концептуальному рівні, вони повинні бути адекватними та простими.

Їх можна використовувати на етапі вибору компоновання верстату. Так при автоматизованому проектуванні компоновок компоновань верстатів застосовується системний підхід та теорія синтезу із застосуванням координатного коду [48].

Також моделі I типу можуть використовуватись для оцінки якості несучої системи в динаміці [11] та при представленні приводів головного руху верстатів у вигляді коливальних систем [20].

Моделі II типу використовуються на стадії ескізного проекту. Їх застосовують для вибору оптимального варіанту, який буде відповідати регламентованим характеристикам працездатності. Вказані моделі дозволяють представити механічні складові верстата у вигляді математичних моделей об'єктів типу ланцюгів, простих циклів і сіток [38].

Моделі III типу дозволяють оцінити верстат за критерієм параметричної надійності [7]. Також вони можуть враховувати ймовірнісну природу процесу обробки на верстатах. При проектуванні верстатів здійснити реалізацію ймовірнісного підходу можна кількома способами: створивши ймовірнісні моделі вузлів та верстатів; використовуючи детерміновані моделі в сполученні зі статистичним моделюванням; здійснюючи статистичні випробування; а також застосовуючи моделі параметричних відмов (дозволяють отримати рішення при прогнозуванні параметричної надійності).

Методика проектування спеціальних верстатів (багатошпindelних, агрегатних та спеціалізованих) має певні відмінності від загальної методики проектування приводів верстатів [13].

В останні роки все більше використання знаходять верстати з паралельною кінематикою. Основи теорії проектування таких верстатів приведені в колективній праці авторів [14]. Також вони акцентують увагу на можливості використання при проектуванні верстатів різних груп агрегатно-модульного принципу.

При проектуванні верстатів доцільно використовувати спеціалізовані програмні продукти типу MathCAD [49].

1.2.3. Патенті дослідження

При виконанні кваліфікаційної роботи важливе місце займає інформаційно-патентний пошук, який проводиться з метою встановлення технічного рівня об'єкту дослідження на основі аналізу доступної науково-технічної інформації [21]. Такий пошук проводять як по відкритим науково-метричним базам, так і по базах даних які містять інформацію про патенти.

При проведенні патентного пошуку необхідно визначити код патенту (розділ, клас, підклас, група, підгрупа), для цього скористаємось електронною версією МПК (2021.01).

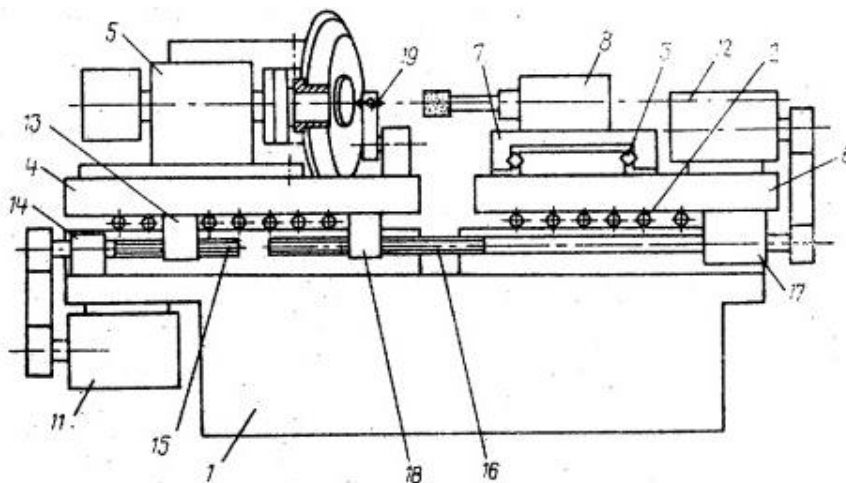
Провівши пошук (рис. 1.6), ми обрали наступну категорію для пошуку: B24B5/00. При проведенні патентного дослідження об'єктом дослідження є існуючі конструкції шліфувальних верстатів та способи торцевого шліфування. Розглянемо патенти які були знайдені при проведенні патентного пошуку.

| | |
|--|---|
| B24 ШЛІФУВАННЯ; ПОЛІРУВАННЯ | |
| B24 | Примітка(и) У цьому класі нижченаведений термін вживається у такому значенні: <ul style="list-style-type: none"> "шліфування" означає, у найбільш загальному розумінні, верстатне оброблення і охоплює, зокрема, операції оброблення, призначені для покращення чистоти поверхонь |
| B24B ВЕРСТАТИ, ПРИСТРОЇ АБО ПРОЦЕСИ ДЛЯ ШЛІФУВАННЯ АБО ПОЛІРУВАННЯ (шляхом електроерозійного оброблення B23H; абразивне струминне або інше подібне оброблення B24C; електролітичне травлення або полірування C25F 3/00); ПРАВЛЕННЯ АБО ПРИВЕДЕННЯ В НАЛЕЖНИЙ СТАН АБРАЗИВНИХ ПОВЕРХОНЬ; ПОДАВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ШЛІФУВАННЯ, ПОЛІРУВАННЯ АБО ПРИТИРАННЯ [2] | |
| B24B | Примітка(и) [4] <ol style="list-style-type: none"> У цьому підкласі нижченаведений термін вживається у такому значенні: <ul style="list-style-type: none"> "полірування" означає згладжування нерівностей поверхні, тобто поліпшення якості поверхні, але не оброблення для забезпечення заданої точності розмірів, як це відбувається при шліфуванні. Необхідно зважати на Примітки (1) і (2) після заголовка підкласу B23F. |
| B24B | Показник ПРОЦЕСИ ШЛІФУВАННЯ АБО ПОЛІРУВАННЯ, НЕ ПОВ'ЯЗАНІ З ОСОБЛИВИМИ ВЕРСТАТАМИ, ПРИСТРОЯМИ АБО ОБРОБЛЮВАНИМИ ДЕТАЛЯМИ ШЛІФУВАННЯ; ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРНІ ОСОБЛИВОСТІ ШЛІФУВАННЯ, ПОЛІРУВАННЯ АБО ЧИСТОВОГО ОБРОБЛЕННЯ Шліфування поверхонь простої форми Шліфування поверхонь спеціальної форми Шліфування або полірування за допомогою абразивних стрічок Переносні верстати Інші верстати Складові частини Вимірювання, індикація, керування; засоби безпеки Правлення або приведення в належний стан шліфувальних інструментів; подавання або нанесення матеріалів для шліфування, полірування або притирання ПОЛІРУВАННЯ АБО ЧИСТОВЕ ОБРОБЛЕННЯ Полірування, вигладжування галтування Хонінгування, суперфінішування Притирання |
| | B24B 1/00 B24B 5/00, B24B 7/00, B24B 9/00, B24B 11/00 B24B 3/00, B24B 13/00-B24B 19/00 B24B 21/00 B24B 23/00 B24B 25/00, B24B 27/00 B24B 41/00-B24B 47/00 B24B 49/00, B24B 51/00; B24B 55/00 B24B 53/00; B24B 57/00 |
| B24B 1/00 - B24B 27/00 | Примітка(и) [4] У групах B24B 1/00-B24B 27/00, терміни "шліфування" і "полірування" при обробленні скла вважаються еквівалентними. |

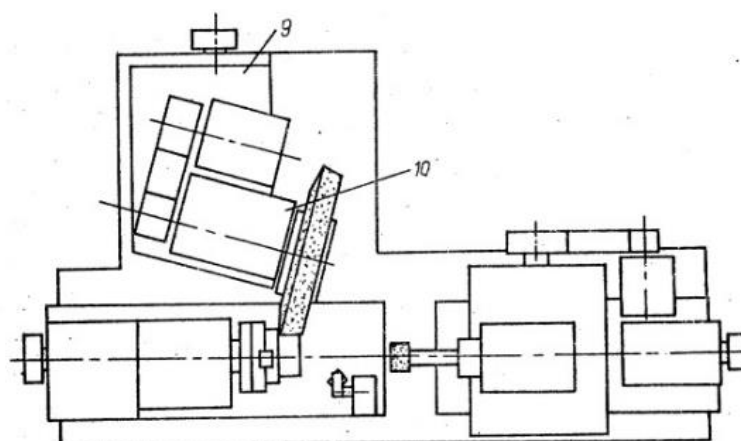
Рис. 1.6. Вибір кола патентного пошуку

Шліфувальний верстат з ЧПК для зовнішнього та внутрішнього шліфування. Авторське свідоцтво № 1652043 [2].

Авторами запропоновано конструкцію шліфувального верстату, який дозволяє здійснювати операції зовнішнього та внутрішнього шліфування. Верстат містить станину з повздовжніми напрямлюючими, на яких розміщено бабку виробу зі столом, на поперечних напрямлюючих розміщено каретка поперечного переміщення, в якій закріплено механізм для правки круга. Всі приводи верстату виконані у вигляді механізму гвинт-гайка. Особливістю конструкції є те, що стіл бабки виробу та стіл бабки для внутрішнього шліфування кінематично пов'язані між собою через гвинт приводу стола бабки. Конструкція цього верстату приведена на рис. 1.7.



Вигляд спереду



Вигляд зверху

Рис. 1.7. Шліфувальний верстат з ЧПК для зовнішнього та внутрішнього шліфування (Авторське свідоцтво № 1652043)

Шліфувальний верстат. Патент України №2909 [30].

Представлений шліфувальний верстат (рис. 1.8) може використовуватись у складі гнучких автоматизованих виробництв. Дана конструкція запропонована автором для розширення технологічних можливостей верстату, а саме для розширення номенклатури оброблюваних поверхонь.

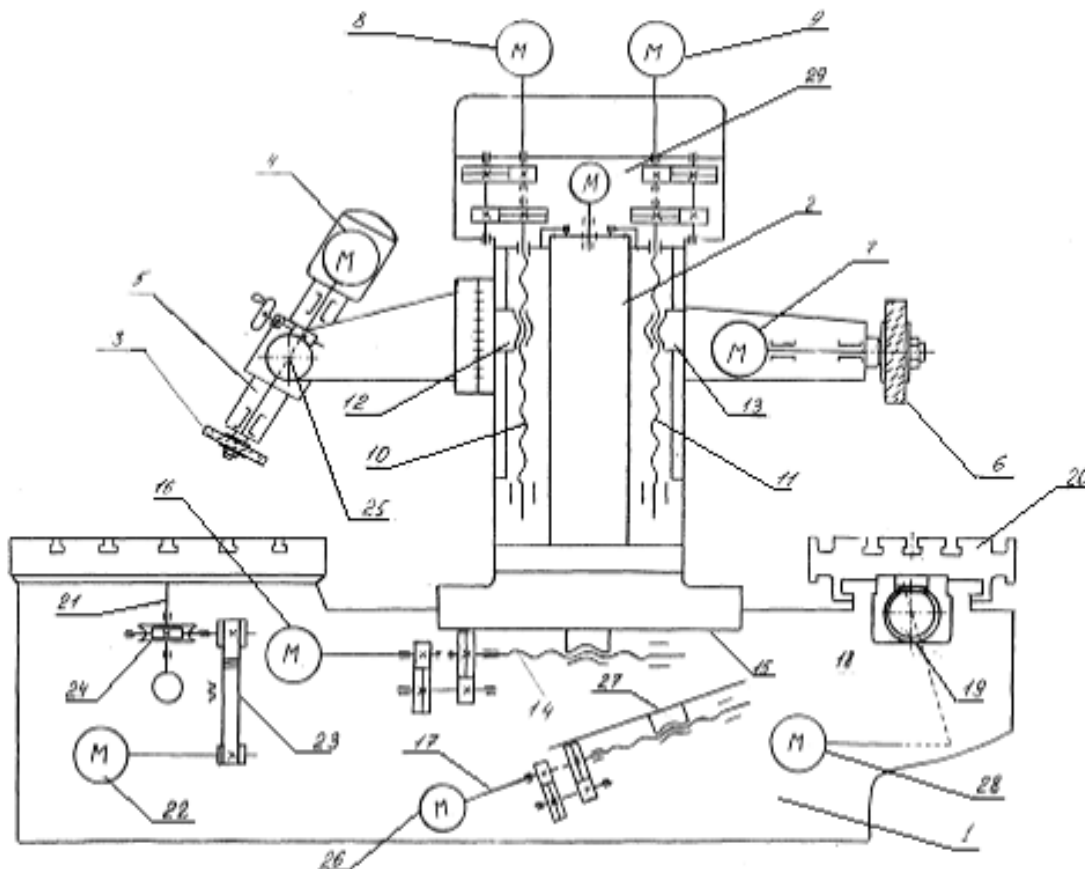


Рис. 1.8. Шліфувальний верстат (Патент України № 2909)

Особливістю запропонованої конструкції верстату є те, що в ньому використовуються два шліфувальних круги з незалежними приводами головного руху. При цьому ці круги розміщені на кронштейнах колони яка є поворотною. Для забезпечення комплексу необхідних рухів кронштейни оснащені механізмами приводів вертикальної та кругової подача, а також механізмом, який забезпечує повздовжнє переміщення колони.

Запропонована конструкція верстату дозволяє обробляти на верстаті торцеві поверхні циліндричних коліс. Верстат також дозволяє обробляти плоскі поверхні, здійснювати заточку різців. Також на ньому передбачено можливість обробки конічних та фасонних поверхонь.

Шліфувальний верстат. Патент України № 6033 [34].

В поле нашого патентного пошуку потрапив патент № 6033, який розширяє технологічні можливості верстата, що розглядався в патенті № 2909. Перш за все верстат був оснащений системою ЧПК (рис. 1.9).

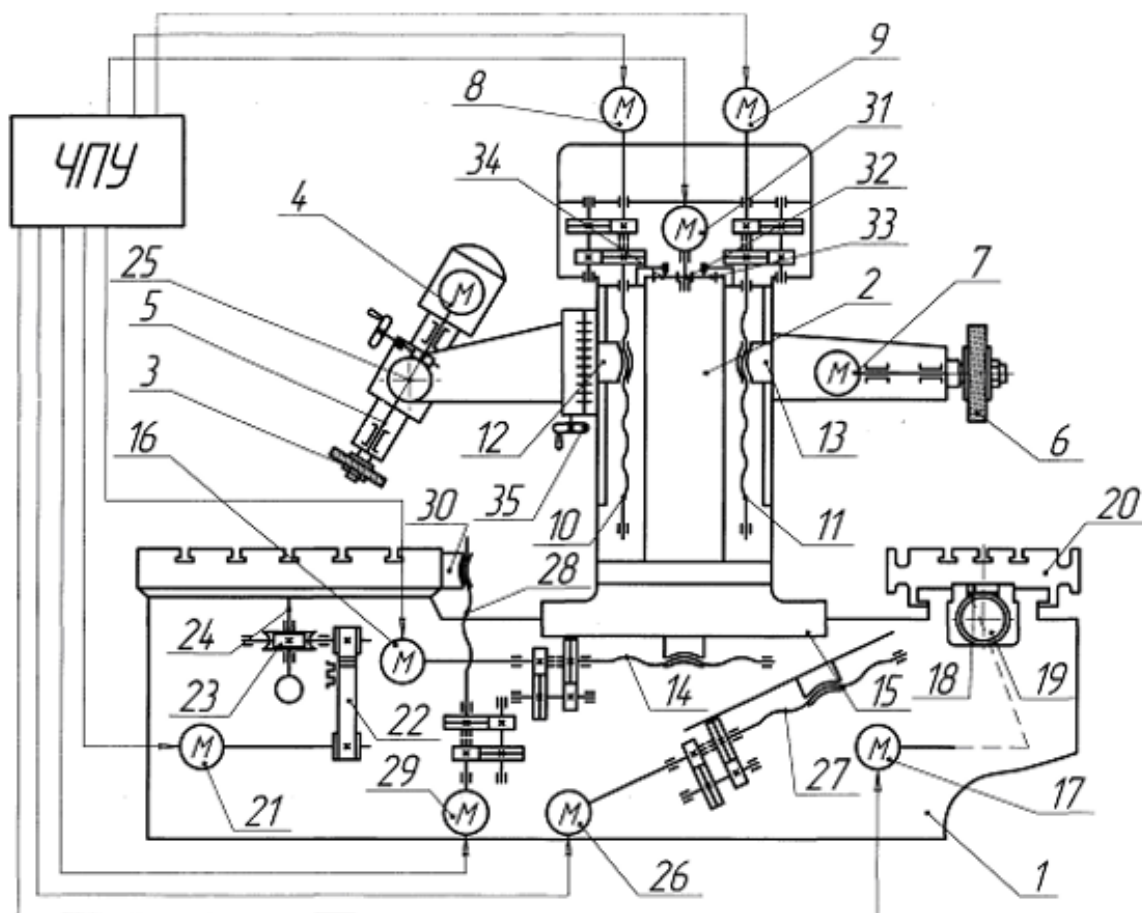
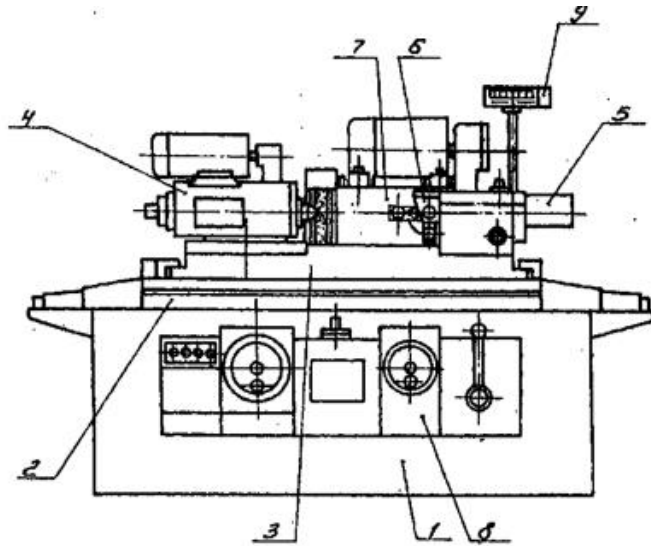


Рис. 1.9. Шліфувальний верстат (патент України № 6033)

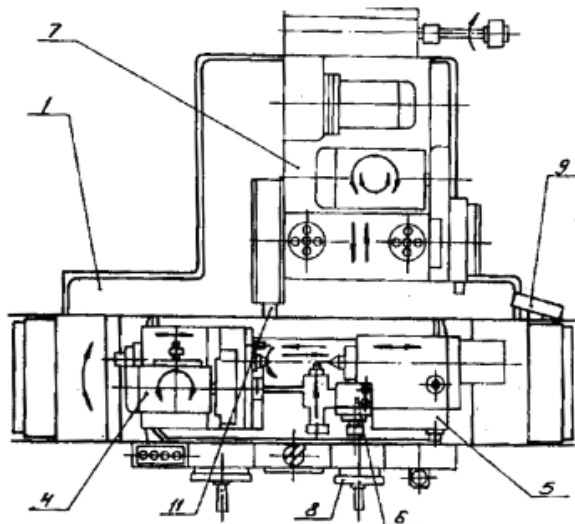
Колона через кронштейн отримала кінематичний зв'язок з механізмом повздовжньої подачі, в конструкцію ввели додатковий механізм повороту. Друга принципова відмінність яку ввели в конструкцію – стіл оснастили механізмом вертикальної подачі.

Універсальний круглошліфувальний верстат. Патент України №3803 [31].

Інший верстат, який розглядається – це універсальний круглошліфувальний верстат (рис. 1.10), який має у своєму складі станину на якій роташовані верхній та нижній столи. Окрім того конструкція передбачає можливість переустановлення передньої поворотної та задньої бабки.



а) - загальний вид верстата



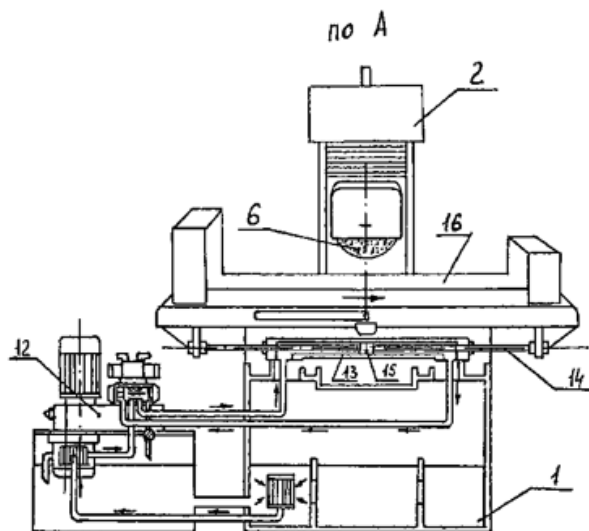
б)- вид верстата зверху

Рис. 1.10. Універсальний круглошліфувальний верстат (Патент України №3803)

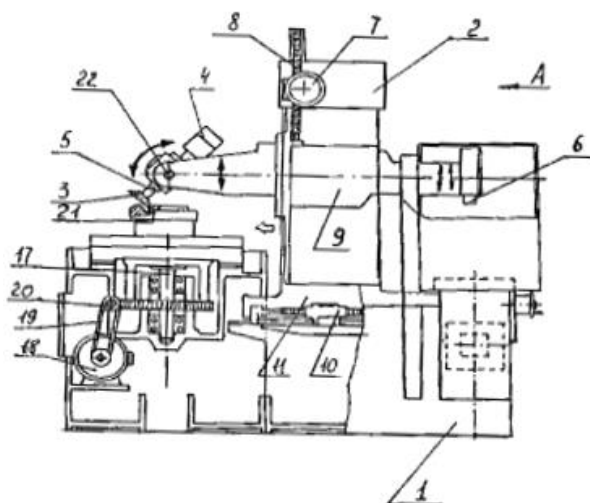
Шліфувальна бабка має привід шпинделя до основного та допоміжного кругів, для якого використовується пасова передача. Також на верстаті є пристрій, який дозволяє здійснювати правку шліфувальних кругів. Крім того на верстаті передбачено механізм поперечних подач. Основною конструктивною відмінністю приведенного верстату від аналогів є наявність приладу цифрової індикації, який контролює поперечну подачу шліфувальної бабки. Також на верстаті встановлено датчик кругових переміщень, що кінематично зв'язаний з ланкою приводу подачі. Опори шпиндельного вузла виконані гідродинамічними, в них використовуються регульовані фланці.

Шліфувальний верстат. Патент № 28792 [28].

Пропонований авторами шліфувальний верстат розширяє технологічні можливості верстату-аналогу. На ньому можна здійснювати обробку конічних та фасонних поверхонь, а також внутрішніх циліндричних поверхонь. Для цього на верстаті встановлено поворотну колону, на якій розміщено привід головного руху. З протилежного боку колони було встановлено шпиндель з механізмом руху подачі (рис. 1.11).



Вид спереду



Вид збоку

Рис. 1.11. Шліфувальний верстат (патент України № 28792)

Крім цього на верстаті в якості спорядження використовується другий шліфувальний круг, який має власний привід обертання. Цей круг встановлений на поворотній осі в перпендикулярній площині, він забезпечує коловий рух подачі.

При обробці колових фасонних поверхонь, колона повертається на 180° і шліфування здійснюють другим кругом. Поворот шпинделя з цим кругом відносно горизонтальної осі дозволяє суттєво розширити технологічні можливості верстата.

Спосіб шліфування циліндричних і торцевих поверхонь. Патент України №40015 [32].

Приведений патент стосується способу шліфування торцевих поверхонь валів, для чого в якості інструменту використовується кільцева ділянка круга, яка призначена для кріплення на круглошліфувальному верстаті. Приведений спосіб передбачає використання кругів прямого профілю, в яких відбувся знос периферії круга і які в інших випадках підлягають утилізації. Приведений у даному патенті спосіб дозволяє використовувати такі круги для шліфування торців циліндричних деталей. Даний спосіб можна застосовувати для шліфування невеликих за розміром деталей. На рис. 1.12 приведено схеми які можуть застосовуватись при шліфуванні циліндричних поверхонь периферією круга.

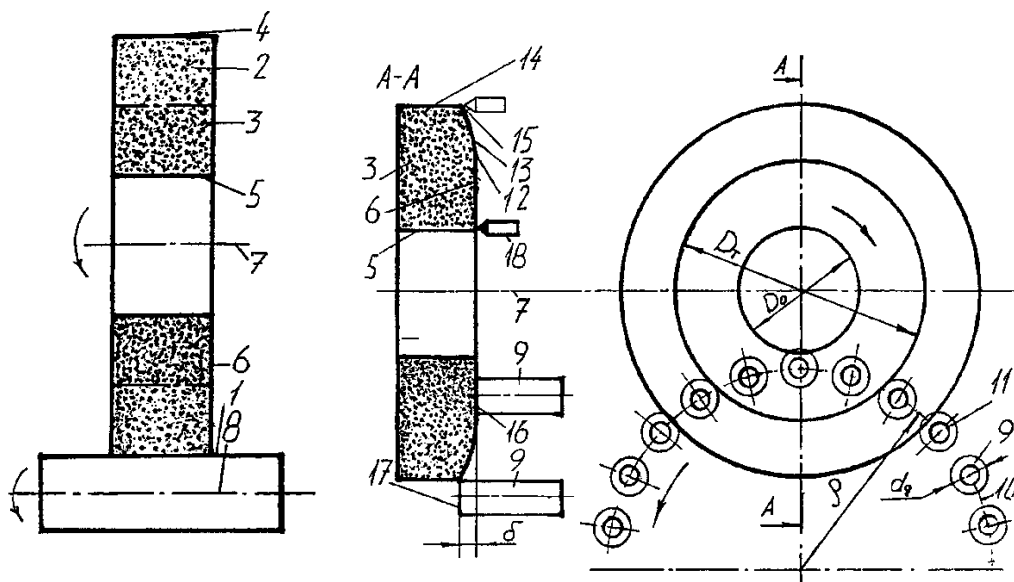


Рис. 1.12. Схема шліфування циліндричних поверхонь периферією круга (патент України № 40015)

Спосіб шліфування торців циліндричних деталей. Патент №40016 [33].

В даному патенті запропоновано спосіб шліфування, який дозволяє здійснювати високопродуктивне чорнове та чистове шліфування торця круглої деталі, при використанні торця плоского круга. Для шліфування використовують круг на керамічній зв'язці. Пропонований спосіб передбачає, що в процесі обробки торцями одночасно виконується чорнове шліфування обох торців деталей (тобто може відбуватися чорнове і чистове шліфування).

На рис. 1.13 приведено схеми двостороннього шліфування торців циліндричних пружин та втулок.

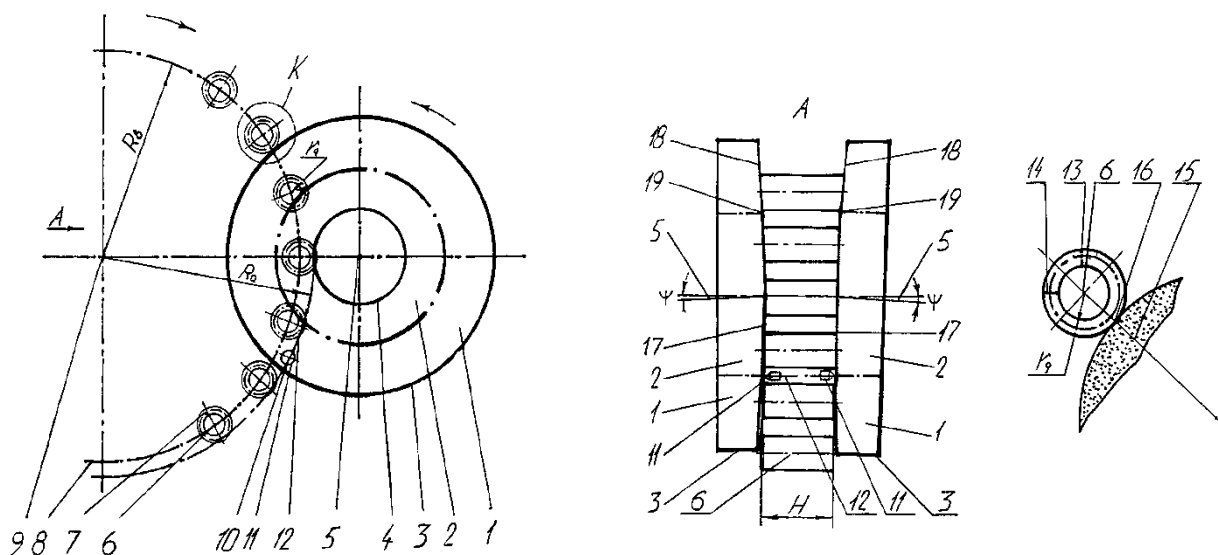


Рис. 1.13. Схеми, які використовуються для двостороннього шліфування торців циліндричних пружин і втулок (патент України № 40016)

1.3. Висновки по розділу, постановка мети та задач дослідження

При проектуванні шліфувальних верстатів, які є яскравим прикладом ТС, доцільно використовувати багатоцільовий підхід. Цей підхід передбачає проведення ряду етапів, а саме поступовий перехід від ідеї до її реалізації через серійну продукцію. Поєднання багатоцільового та системного підходу при проектуванні дозволить, знайти оптимальні конструктивні та компоувальні рішення проєктованих верстатів.

Здійснено аналіз робіт в області проектування верстатів. Для опису металорізальних верстатів доцільно використовувати моделі трьох типів (критеріальні, морфологічні та поведінкові). Їх використання залежить від конкретного етапу проектної процедури.

Сучасне проектування верстатів важко уявити без використання CAD/CAM систем. Автоматизоване проектування передбачає використання моделей I, II та III типів.

На нашу думку при проектуванні верстатів слід використовувати методи морфологічного аналізу, а також агрегатно-модульного принципу.

Проведений інформаційно-патентний пошук дозволив встановити технічний рівень об'єкту дослідження, яким є спеціальний шліфувальний верстат для обробки торцевих циліндричних поверхонь.

Метою роботи є розробка конструкції спеціального шліфувального верстату для обробки торцевої циліндричної поверхні.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких основних задач:

- у відповідності до тематики роботи провести інформаційно-патентні дослідження;
- здійснити необхідні технологічні розрахунки для деталі «Шестерня МБК34М4568»;
- здійснити проектування основних виконавчих вузлів проєктованого верстату;
- здійснити моделювання точності обробки циліндричної поверхні на запропонованому верстаті;
- запропонувати комплекс заходів з охорони праці та безпеки життєдіяльності людини у відповідності до тематики роботи.

РОЗДІЛ 2.

ДОСЛІДНО-ПРОЕКТНИЙ

2.1. Технологічні розрахунки

Для отримання вихідних даних, які необхідні для проектування конструкції проектованого верстату необхідно здійснити технологічні розрахунки стосовно базової деталі, якою є «Шестерня МБК34М4568». Її основне призначення – передача крутного моменту в приводі зернозбирального комбайну. Деталь є відповідальною, вона працює під постійним навантаженням. На рис. 2.1. приведено загальний вигляд деталі.

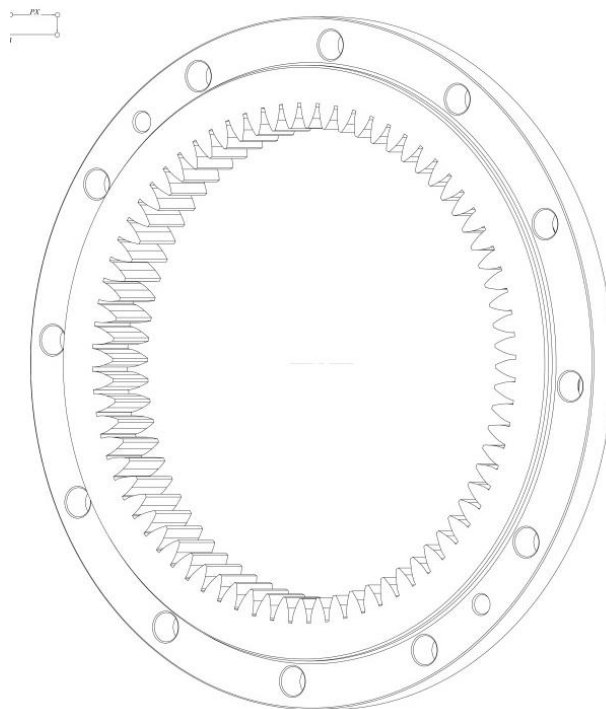


Рис. 2.1 Зовнішній вигляд деталі шестерня «Шестерня МБК34М4568»

Матеріал з якого виготовляється «Шестерня МБК34М4568» – легована конструкційна сталь 25ХГТ [45]. Її, як правило, використовують для виготовлення деталей середніх розмірів, які працюють при високих швидкостях та середньому тиску. Деталь має тверду зносостійку поверхню та міцну і в'язку серцевину.

Деталь «Шестерня МБК34М4568» є технологічною, про що свідчать здійснені на попередньому етапі розрахунки. Отримані значення кількісної оцінки технологічності конструкції знаходяться в допустимих межах.

В якості заготовки для деталі «Шестерня МБК34М4568» обрано поковку, яка пройшла нітроцементацію [4]. Для її отримання на виробництві використовують горизонтально-кувальну машину II-го класу точності.

На рис. 2.2 приведено креслення заготовки для деталі «Шестерня МБК34М4568».

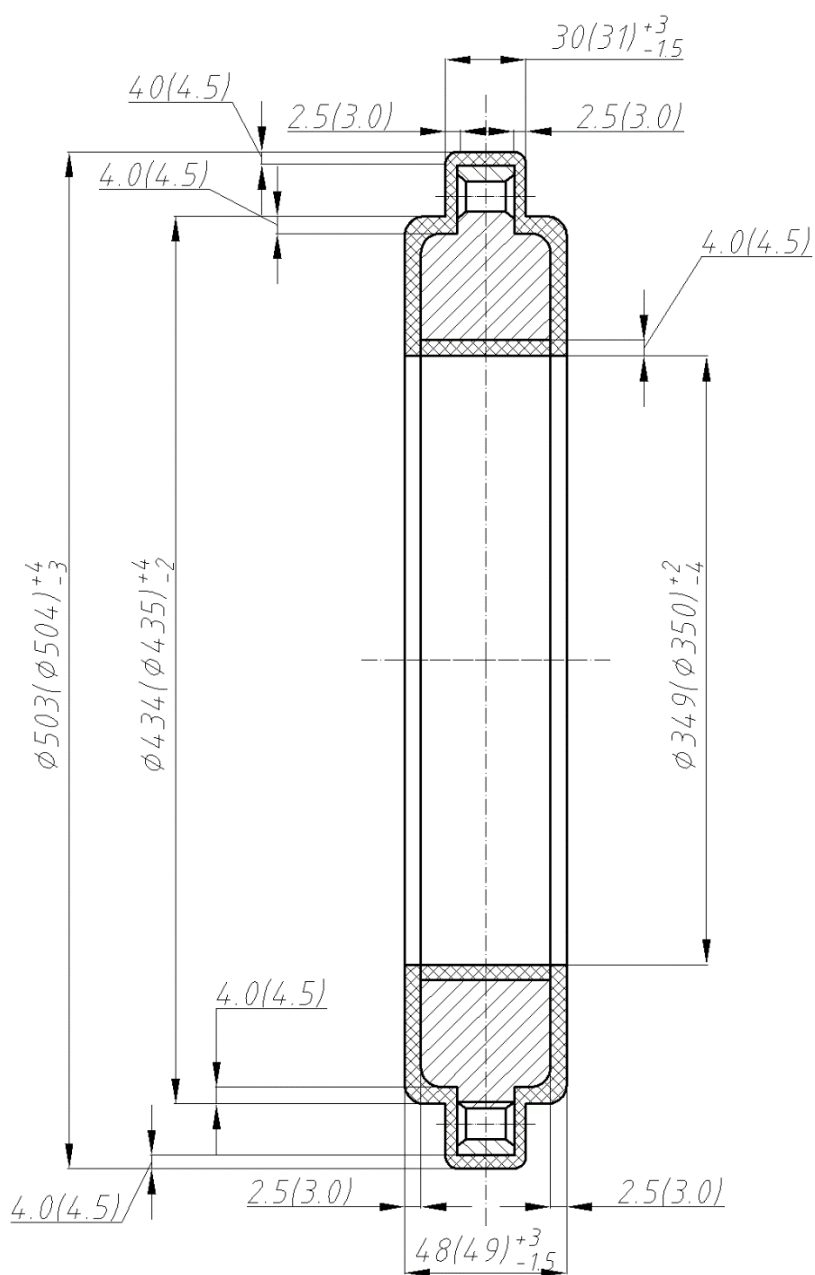


Рис. 2.2. Креслення заготовки деталі «Шестерня МБК34М4568»

На попередньому етапі було здійснено розробку ТП виготовлення деталі «Шестерня МБК34М4568». З метою зменшення кількості технологічного обладнання та підвищення продуктивності обробки в розробленому ТП використовують верстати з ЧПК, а основні його етапи та моделі верстатів які використовуються приведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Проектований ТП (маршрутний)

| Назва технологічної операції | Верстат або обладнання |
|------------------------------|------------------------|
| 005 Токарна з ЧПК | 1П732РФ3 |
| 010 Токарна з ЧПК | 1П732РФ3 |
| 015 Круглошліфувальна | 3А161 |
| 020 Зубодовбальна | 5А140 |
| 025 Зубодовбальна | 5А140 |
| 030 Вертикально-свердлильна | 2Г135 |
| 035 Вертикально-свердлильна | 2Н150 |
| 040 Радіально-свердлильна | 2М55 |
| 045 Радіально-свердлильна | 2М55 |
| 050 Радіально-свердлильна | 2М55 |
| 055 Круглошліфувальна | 3А161 |

Об'єктом дослідження в даній роботі є шліфувальний верстат, тому для технологічних розрахунків обираємо круглошліфувальну операцію 015.

На даній операції передбачається виконання шліфування торця в розмір $\varnothing 427_{(-0,2)}$.

В якості обладнання обираємо спеціальний шліфувальний верстат.

Для закріплення деталі на верстаті використовуємо спеціальне пристосування, яке здійснює базування по внутрішньому отвору і торцю деталі.

В якості різального інструменту використовуємо круг шліфувальний, для якого здійснено спеціальну заточку 2846- 4002-03.

Для контролю точності обробки використовується радіусний шаблон (РШ-1-ГОСТ 4126-82).

Проведемо розрахунки, для цього скористаємось типовими аналітичними виразами [23, 27].

1. Для розрахунків призначаємо довжину робочого ходу інструмента $L_{p.x.} = 35 \text{ мм}$;

2. Проведемо розрахунок, який дозволяє визначити швидкість шліфувального круга:

$$V_{KP} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{KP}}{1000 \cdot 60} = \frac{3,14 \cdot 750 \cdot 1250}{1000 \cdot 60} = 49 \frac{\text{м}}{\text{хв}} \quad (2.1)$$

де, $D = 750 \text{ мм}$ – діаметр шліфувального круга;

$n_{KP} = 1250 \text{ об/хв}$ – число обертів круга (по верстату).

3. Проведемо підбір характеристики шліфувального круга:

Характеристика обробки: шліфувальний круг призначений для одночасного шліфування діаметра і торця.

Клас точності поверхні круга – 7.

Точність обробки: $-\delta > 0,03 \text{ мм}$.

Для виконання операції шліфування приймаємо круг Э5А40С, який обираємо згідно [23, табл. 1, ст. 172].

4. Проведемо розрахунок швидкості V_d (об/хв) та числа обертів деталі $n_{дет}$ (об/хв).

Спочатку згідно [23, карта III-1, ст. 173] визначаємо рекомендовану нормативну швидкість обертання деталі $V = 25 \div 30 \text{ м/хв}$.

Після цього у відповідності до рекомендованої швидкості здійснюємо розрахунок числа обертів шпинделя та уточнюємо її по паспорту базового шліфувального верстату :

$$n_{дет} = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot (25 \div 35)}{3,14 \cdot 427} = 18,65 \div 26,1 \text{ об/хв} \quad (2.2)$$

Згідно паспорту базового шліфувального верстату приймаємо:

$$n = 25 \text{ об/хв.}$$

Наступним кроком є вибір хвилинної поперечної подачі круга S_M мм/хв.

$$S_M = S_{Mnp} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \quad (2.3)$$

де, S_{Mnp} - хвилинна подача по нормативах

K_1 - коефіцієнт, що залежить від матеріалу та швидкості круга;

K_2 - коефіцієнт, що залежить від припуску та точності обробки;

K_3 - коефіцієнт, що залежить від діаметру круга, кількості кругів та характеру поверхні яка обробляється.

$S_{Мпртабл} = 1,6$ мм/хв – обираємо по [46, табл. Ш1].

$K_1 = 0,9$; $K_2 = 1,2$; $K_3 = 1,0$ [46].

Тоді

$$S_{Мпр} = 1,6 \cdot 0,9 \cdot 1,2 \cdot 1,0 = 1,73 \text{ мм/хв}$$

$$S_{Мокр} = 0,35 \cdot 0,9 \cdot 1,2 \cdot 1,0 = 0,378 \text{ мм/хв}$$

$$S_{Мторця} = 1,0 \cdot 0,5 \cdot 1,2 \cdot 1,0 = 1,08 \text{ мм/хв}$$

6. Проведемо розрахунок часу виходжування:

а) на шліфування діаметру:

$$t_{вих1} = 0,09 \text{ хв [46]}$$

б) на шліфування торця:

$$t_{вих2} = 0,81 \text{ хв [46]}$$

в) загальний час виходжування:

$$\sum t_{вих} = t_{вих1} + t_{вих2} = 0,09 + 0,18 = 0,27 \text{ хв}$$

7. Проведемо розрахунок величини шару, який знімається при здійсненні виходжування: $a_{вих}$, мм

а) при шліфуванні діаметру:

$$a_{вихдіам} = 0,04 \text{ мм, [46]}$$

б) при шліфуванні торця

$$a_{вихторц} = 0,05 \text{ мм, [46]}$$

8. Проведемо розрахунок машинного часу t_M , хв.

а) при шліфуванні діаметру:

$$t_M' = \frac{1,3a_{np}}{S_{Мпр}} + \frac{a}{S_{Мок}} + t_{вих} \quad (2.4)$$

$$t_M' = \frac{1,3 \cdot 1,5 \cdot 0,5}{1,73} + \frac{1,5 - (0,75 + 0,04)}{0,378} + 0,09 = 2,488 \text{ хв}$$

б) при шліфуванні торця:

$$t_M'' = \frac{1.3(a - a_{вих})}{S_M} + t_{вих} \quad (2.5)$$

$$t_M'' = \frac{1.3 \cdot (1.5 \cdot 0.05)}{1.08} + 0.18 = 1.925 \text{ хв}$$

в) здійснимо розрахунок загального машинного часу:

$$t_M = t_M' + t_M'' = 2.488 + 1.925 = 4.413 \text{ хв} \quad (2.6)$$

9. Розрахуємо необхідну потужність різання при врізному шліфуванні:

$$N = C_N \cdot V_D^y \cdot S^y \cdot d^D \cdot v^Z \quad (2.7)$$

де, d – діаметр шліфування, мм

V – швидкість обертання деталі, м/хв.

S – радіальна подача мм/об

v – ширина шліфування, мм.

$$C_N = 0.14; r = 0.8; x = 0.8; z = 1.0; D = 0.2 \text{ [46].}$$

Тоді ми отримаємо

$$N = 0.14 \cdot 33^{0.8} \cdot 0.003 \cdot 427^{0.2} \cdot 9.5^{1.0} = 17.1 \text{ кВт.}$$

Отже проєктований верстат повинен забезпечити ефективну потужність різання $N = 17.1 \text{ кВт.}$

2.2. Розробка структурно-кінематичної схеми верстату

Обробка деталі «Шестерня МБК34М4568» передбачає, що обладнання на якому буде здійснюватися обробка, зможе забезпечити необхідний набір формуютьорюючих рухів [26].

Обробка даної деталі передбачає виконання цілого ряду технологічних операцій: точіння, розточування, фасонне точіння, нарізання різі, свердління та шліфування. В таблиці 2.2. приведено основну інформацію про операції та формуютьорюючі рухи які необхідно забезпечити при її здійсненні.

Таблиця 2.2. Характеристика основних формоутворюючих рухів

| № п/п | Назва операції | Схема формоутворення | Формоутворюючі рухи |
|-------|-------------------------|----------------------|--|
| 1 | Зенкування отвору | | 1. Твірна лінія: Метод дотику $\Phi V(O_1) + \Phi S(P_2)$ 2. Напрямна лінія: Метод копіювання |
| 2 | Свердління отвору | | 1. Твірна лінія: Метод сліду - $\Phi V(O_1)$ 2. Напрямна лінія: Метод сліду - $\Phi S(P_2)$ |
| 3 | Зенкерування отвору | | 1. Твірна лінія: Метод сліду - $\Phi V(O_1)$ 2. Напрямна лінія: Метод сліду - $\Phi S(P_2)$ |
| 4 | Зубодовбання | | 1. Твірна лінія: Метод копіювання 2. Напрямна лінія: Метод сліду - $\Phi S(P_2)$ |
| 5 | Нарізання різі | | 1. Твірна лінія: Метод копіювання 2. Напрямна лінія: Метод сліду $\Phi(O_1 P_2) + Vp(P_3)$ |
| 6 | Шліфування | | 1. Твірна лінія: Метод дотику $\Phi V(O_1) + \Phi S(P_2)$ 2. Напрямна лінія: Метод дотику $\Phi V(O_3) + \Phi V(O_1)$ |
| 7 | Розточування | | 1. Твірна лінія: Метод сліду - $\Phi V(O_1)$ 2. Напрямна лінія: Метод сліду - $\Phi S(P_2)$ |
| 8 | Зовнішнє точіння | | 1. Твірна лінія: Метод сліду - $\Phi V(O_1)$ 2. Напрямна лінія: Метод сліду - $\Phi S(P_2)$ |
| 9 | Підрізання торця різцем | | 1. Твірна лінія: Метод сліду - $\Phi V(O_1)$ 2. Напрямна лінія: Метод сліду - $\Phi S(P_2)$ |

Обробка деталі на шліфувальному верстаті потребує забезпечення двох методів дотику: $\Phi V(O_1) + \Phi S(\Pi_2)$ та $\Phi V(O_3) + \Phi V(O_1)$.

При цьому нам необхідно забезпечити обертання шліфувального круга (головний формоутворюючий рух $\Phi V(O_1)$), а для того, щоб забезпечити

Головним рухом формоутворення є обертання шліфувального круга $\Phi V(O_1)$. Для формоутворення поверхні по всьому периметру деталі необхідно забезпечити рух кругової подачі обертання заготовки $\Phi V(O_3)$ та рух радіальної подачі $\Phi S(\Pi_2)$. Ці рухи повинні бути забезпечені кінематикою верстата.

На основі аналізу різних кінематичних схем шліфувальних верстатів вибираємо структурно-кінематичну схему яка приведена на рис. 2.3.

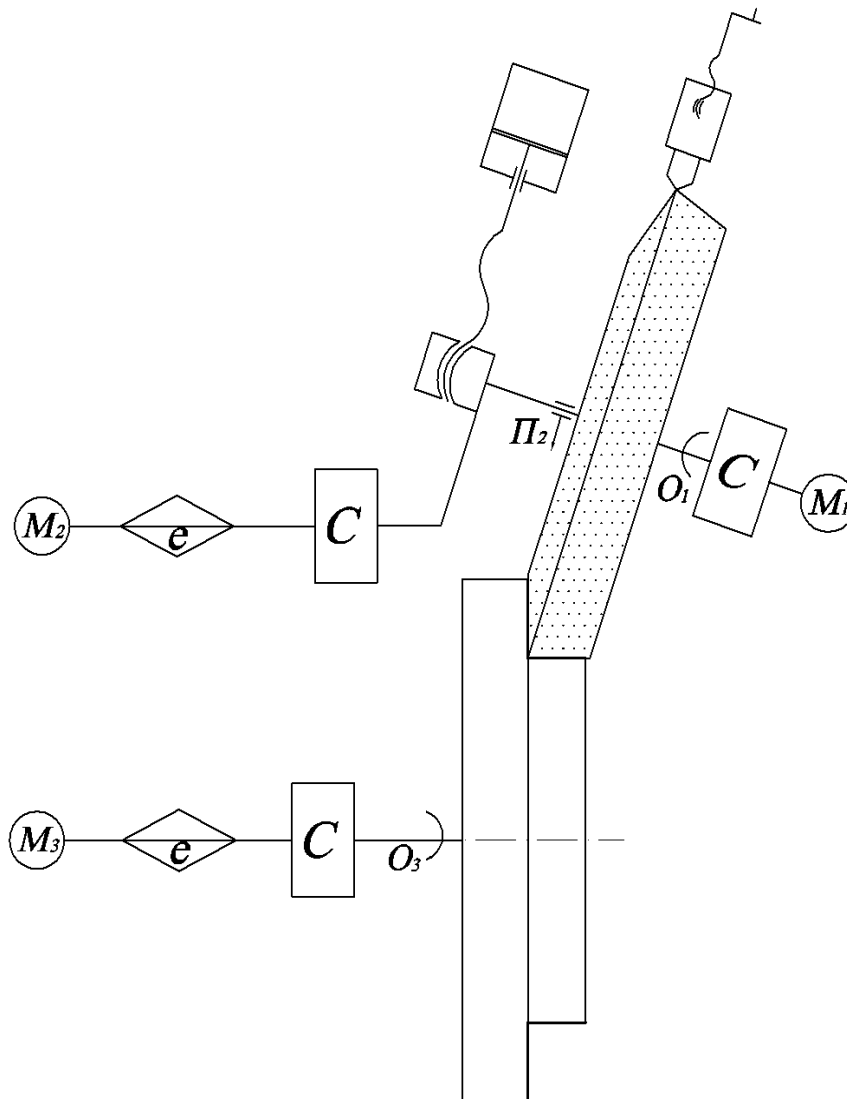


Рис. 2.3. Структурно-кінематична схема проектованого шліфувального верстата

2.3. Оптимізація компоувальної схеми верстату

Як зазначалось раніше, за базовий верстат обрано шліфувальний верстат на якому буде здійснюватися обробка внутрішніх та зовнішніх циліндричних, конічних, а також торцевих поверхонь.

Для забезпечення процесу обробки на верстаті базової деталі, він повинен забезпечити певний набір формоутворюючих рухів, а саме обертання заготовки, обертання інструменту, відносно переміщення інструменту та деталі.

Кінематична структура верстату є первинним фактором який визначає компоувальну схему верстату. Тому в основу аналізу структури компоунок проєктованого верстату беруть структурно-кінематичну схему, яка дозволяє розкрити структуру компоунок.

Формалізований опис компоувальних схем верстата дозволяє розкрити структуру верстата та дає уявлення про розміщення окремих блоків. Для цього найкраще використовувати математичний апарат, який запропоновано Враговим Ю.Д. [8]. У відповідності до основних теоретичних положень запропонованих автором, під структурною формулою компоунок верстата будемо розуміти певну послідовність символів, що означають блоки верстата та розкривають їх координатну причетність.

Для початку запишемо загальну матрицю можливих компоувань:

$$A = C_h du\{0, Z, X\}e \quad (2.8)$$

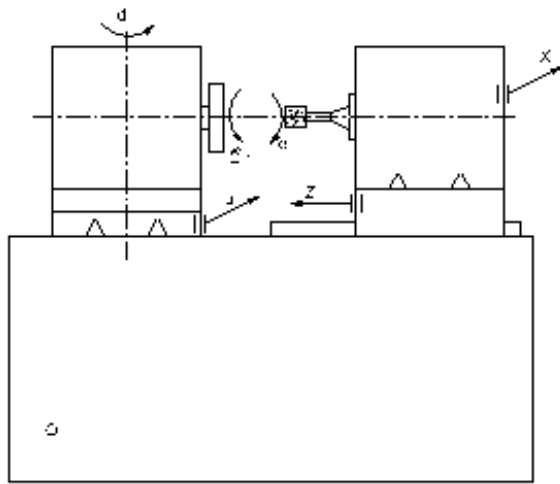
Загальна кількість можливих варіантів компоувань становить: $K = 3! = 6$

Нижче приведено матрицю можливих для проєктованого шліфувального верстату компоувань в розгорнутому вигляді:

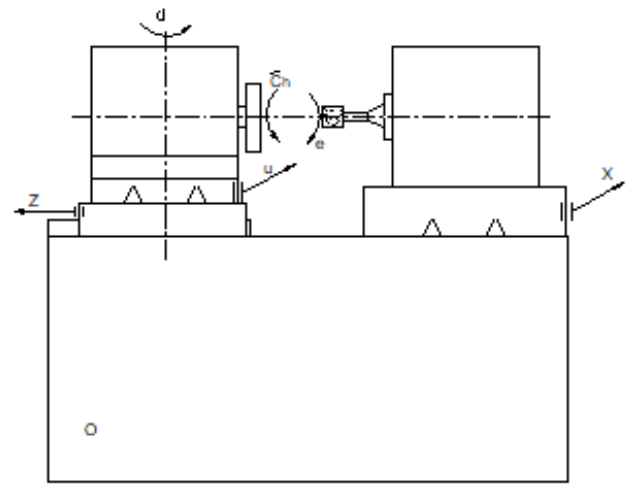
$$A = C_h du \begin{vmatrix} XZ0 & X0Z & 0XZ \\ ZX0 & X0Z & 0ZX \end{vmatrix}$$

Наступним кроком є графічне представлення можливих варіантів компоувальних схем (на основі матриці приведеної вище).

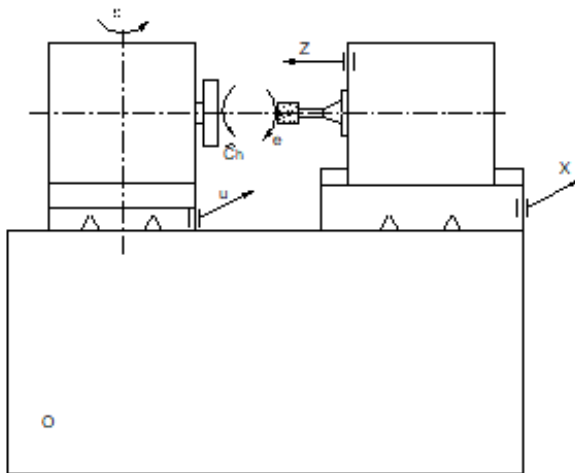
Представимо всі можливі варіанти компоувальних схем, які включає в себе матриця (рис. 2.4).



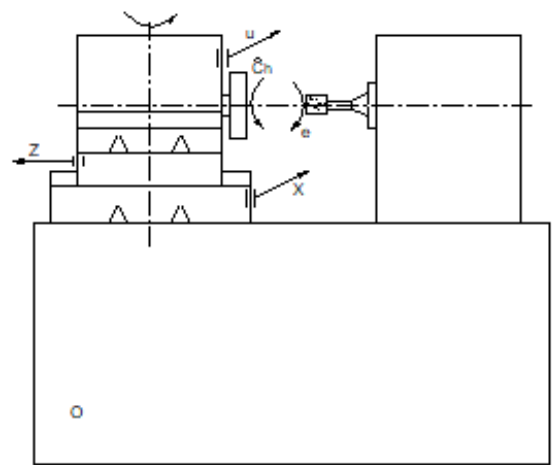
ChduOZXe



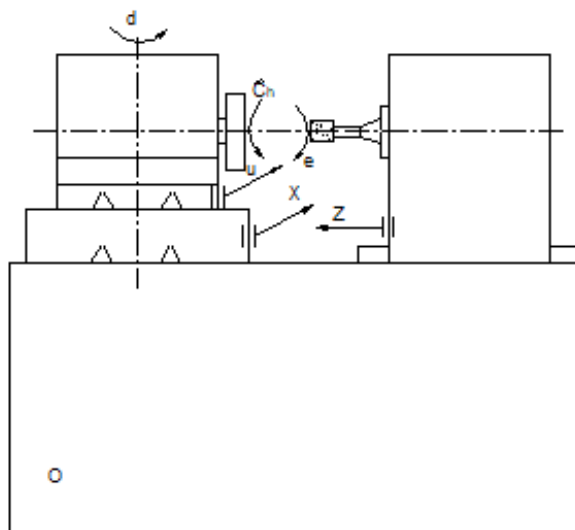
ChduZOXe



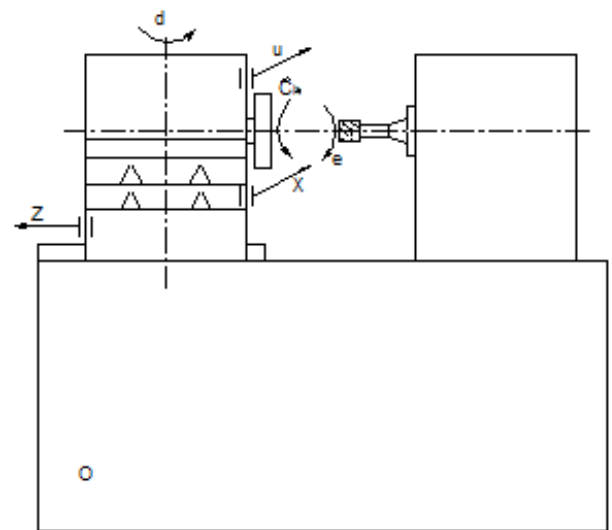
ChduOXZe



ChduZXOe



ChduXOZe



ChduXZOe

Рис. 2.4. Можливі варіанти компоувальних схем верстату

Переходимо до вибору оптимального компоновання верстату. Для цього скористаємось структурними ознаками відбору компоновань, які ґрунтуються як виходячи із технологічних, так і конструктивних міркувань. Умови відбору компоновань приведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. Умови відбору компоновань

| № п/п | Зміст умови відбору | Формула відбору |
|-------|--|---|
| 1 | Блок, який має найбільшу рухомість повинен прилягати до стаціонарного в гільці інструмента | $M_1 = \emptyset + X0Z + 0ZX$ |
| 2 | Переміщення надається тільки інструменту | $M_2 = \emptyset + \emptyset + 0\bar{0}\bar{0}$ |
| 3 | Поперечно-рухомий блок повинен бути як найбільш віддалений від стаціонарного | $M_3 = XZ0 + \emptyset + 0ZX$ |

Просумуємо дані умови відбору, результатом стане компоновальна схема, яка приведена на рис. 2.5.

$$M_1 = \emptyset + X0Z + 0ZX$$

$$M_2 = \emptyset + \emptyset + 0\bar{0}\bar{0}$$

$$M_3 = XZ0 + \emptyset + 0ZX$$

$$\sum M = \emptyset + \emptyset + 0ZX$$

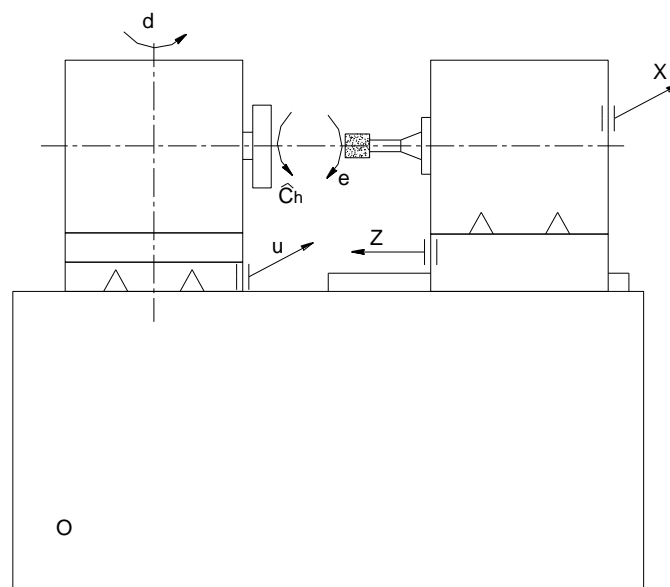


Рис. 2.5. Обрана схема компоновання верстату

2.4. Кінематичний розрахунок верстату

Структура приводу проектованого шліфувального верстату повинна забезпечити весь комплекс рухів, який необхідний для забезпечення формоутворення на верстаті, а також повинна передбачати можливість здійснення допоміжних переміщень (підведення та відведення інструменту в зону різання, поворот робочих органів в задані положення та ін.).

Шліфувальний верстат повинен забезпечувати плавну обробку заготовки на високій швидкості, тому з конструктивних та технологічних міркувань обираємо для нього електромеханічний привід до складу якого буде входити електродвигун та клинопасова передача.

Здійснимо розрахунки приводу головного руху, приводу подач та приводу передньої бабки.

1. Проведемо розрахунок приводу головного руху.

Для цього спочатку визначимо передаточне число приводу:

$$i_{np} = \frac{n_{un}}{n_{ов}} = \frac{1250}{1500} = 0,83 \quad (2.9)$$

Далі необхідно вибрати \emptyset ведучого шківa $D_1 = 175 \text{ мм}$.

Використовуючи аналітичну залежність яка враховує коефіцієнт відносного ковзання $\epsilon=0,015$, знаходимо \emptyset веденого шківa:

$$D_2 = \frac{D_1}{i_{np}} (1 - 0,015) = \frac{175}{0,83} (1 - 0,015) = 207,7 \text{ мм} \quad (2.10)$$

На основі стандартизованого ряду чисел [47, ст. 68] приймаємо наступні діаметри шківів: $D_1 = 175 \text{ мм}$, $D_2 = 200 \text{ мм}$.

Наступним кроком є визначення міжшківної відстані a , її обираємо в інтервалі:

$$a_{min} = 0,55 \cdot (D_1 + D_2) + h = 0,55 \cdot (175 + 200) + 10,5 = 216,75 \text{ мм}$$

$$a_{max} = 2 \cdot (D_1 + D_2) = 2 \cdot (175 + 200) = 750 \text{ мм}$$

З конструктивних міркувань приймаємо значення $a = 600 \text{ мм}$.

Далі необхідно визначити діапазон регулювання R , його визначаємо за виразом:

$$R = \frac{n_{max}}{n_{min}} \quad (2.11)$$

де n_{max} - максимальна частота обертання шпинделя,

n_{min} - мінімальна частота обертання шпинделя.

Оскільки у нас не передбачено ступеневе регулювання, то відповідно до прийнятої схеми маємо:

$$n_{max} = n_{min} = 1250 \text{ об/хв, тоді } R = 1$$

На рис. 2.6 приведено спроектовану кінематичну схему приводу головного руху.

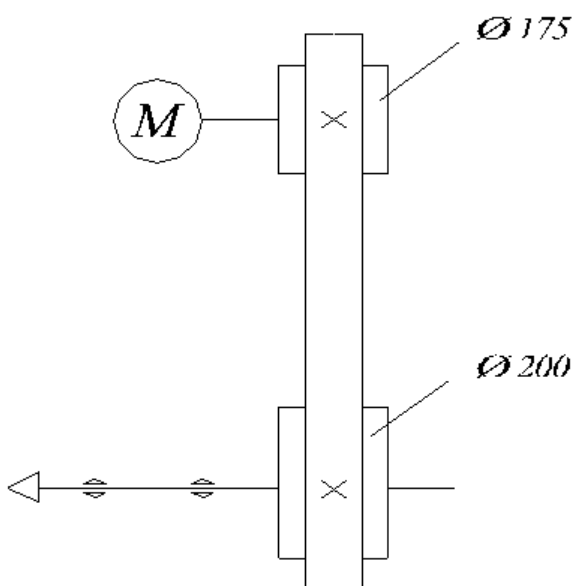


Рис. 2.6. Кінематична схема приводу головного руху

2. Проведемо розрахунок приводу передньої бабки.

Конструкція шпинделя передньої бабки передбачає використання електродвигуна постійного струму (ДПС) з приводом, в якого частота обертання знаходиться в діапазоні 150 ÷ 1500 об/хв. Шпиндель монтується на двох підшипниках кочення. На рис. 2.7 приведено кінематичну схему приводу бабки, де кріпиться оброблювана заготовка.

Як видно з приведенного рисунку шпиндель отримує оберти від ДПС через клинопасові передачі. Їх натяг можна здійснити через переміщення підмоторної плити з електродвигуном.

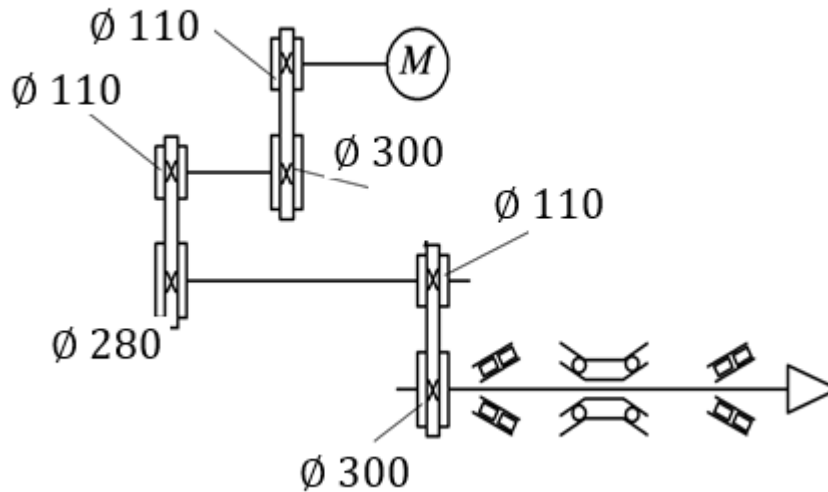


Рис. 2.7. Кінематична схема приводу бабки виробу

Проектований верстат повинен забезпечити можливість обробки на ньому деталей в діапазоні:

$$d_{min} = 120 \text{ мм}; \quad d_{max} = 1200 \text{ мм}$$

На основі рекомендованої нормативами швидкості обертання деталі здійснимо визначення максимального та мінімального числа обертів шпинделя передньої бабки, для цього скористаємось виразами:

$$n_{min} = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d_{max}} = \frac{1000 \cdot 33}{3,14 \cdot 1200} = 8,8 \text{ об/хв} \quad (2.12)$$

$$n_{max} = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d_{min}} = \frac{1000 \cdot 33}{3,14 \cdot 120} = 88 \text{ об/хв} \quad (2.13)$$

Для приведеної схеми визначаємо загальний діапазон регулювання:

$$R = \frac{n_{max}}{n_{min}} = \frac{88}{8,8} = 10 \quad (2.14)$$

Далі необхідно визначити діапазон регулювання двигуна:

$$R_{дв} = \frac{n_{max}}{n_{min}} = \frac{1500}{150} = 10 \quad (2.15)$$

Тобто діапазон регулювання двигуна повністю забезпечує загальний діапазон регулювання.

Визначаємо частоту обертання шпинделя:

$$n_{шт} = n_{дв} \cdot 0,985 \cdot i_{n,n} \quad (2.16)$$

де 0,985 – коефіцієнт, що враховує ковзання паса.

Для попередньо визначеного $n_{min} = 150$ об/хв

Для n_{min} матимемо:

$$n_{um} = 150 \cdot 0,985 \cdot i_{n.n} = 8,8 \text{ об/хв}$$

Тоді:

$$i_{п.п} = \frac{8,8}{150 \cdot 0,985} = 0,06$$

Виходячи з конструктивних міркувань недоцільно застосовувати одну клинопасову передачу, тому пониження обертів використаємо три клинописові передачі. Тоді:

$$i_1 = 0,36; \quad i_2 = 0,42; \quad i_3 = \frac{i_{п.п.}}{i_2 \cdot i_1} = \frac{0,06}{0,42 \cdot 0,36} = 0,4$$

Вибираємо діаметри ведучих шківів:

Для I клинопасової передачі: $D_1 = 110$ мм;

Для II клинопасової передачі: $D_1 = 110$ мм;

Для III клинопасової передачі: $D_1 = 110$ мм.

Знаходимо відповідні діаметри D_2 ведених шківів (приймавши відносне ковзання $\varepsilon=0,015$) за формулою:

$$D_2 = \frac{D_1}{i} (1 - 0,015) \quad (2.17)$$

Для I клинопасової передачі:

$$D_2 = \frac{110}{0,36} (1 - 0,015) = 301 \text{ мм}$$

Для II клинопасової передачі:

$$D_2 = \frac{110}{0,42} (1 - 0,015) = 258 \text{ мм}$$

Для III клинопасової передачі:

$$D_2 = \frac{110}{0,4} (1 - 0,015) = 271 \text{ мм}$$

Згідно довідника приймаємо наступні діаметри шківів [47, с. 68].

Для I клинопасової передачі: $D_1 = 110$ мм; $D_2 = 300$ мм.

Для II клинопасової передачі: $D_1 = 110$ мм; $D_2 = 280$ мм.

Для III клинопасової передачі: $D_1 = 110$ мм; $D_2 = 300$ мм.

3. Розробимо конструктивну схему приводу руху подач

Даний привід використовується для компенсації подачі шліфувальної бабки на встановлену величину вперед або назад. Для цього використовується електродвигун від якого через муфту та пару зубчастих коліс здійснюється передача обертів на вал механізму швидкого підводу (рис. 2.8).

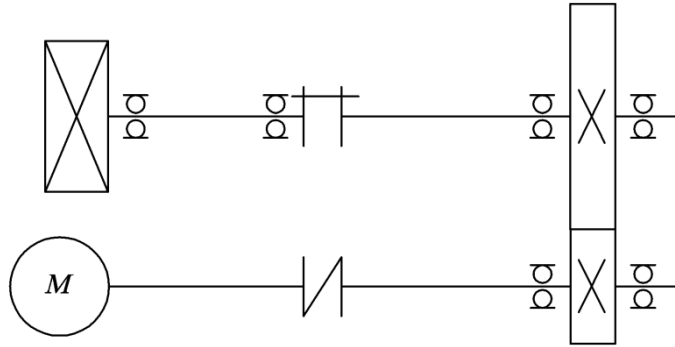


Рис. 2.8. Кінематична схема приводу руху подач

2.5. Вибір потужності і типів двигунів для приводів верстату

1. **Привід головного руху.** Потужність двигуна для даного приводу вибираємо по ефективній потужності різання:

$$N_{\text{дв}} = \frac{N_{\text{еф}}}{\eta} + N_{\text{х.х}}, \text{ кВт} \quad (2.18)$$

Згідно попередніх розрахунків

По ефективній потужності різання і коефіцієнту корисної дії верстату підбирають потужність електродвигуна.

Ефективна потужність різання (див. п. 2.1) $N_{\text{еф}} = 17,1$ кВт

ККД приводу головного руху:

$$\eta = \eta_{\text{н.н.}} \cdot \eta_{\text{н.}} = 0,97 \cdot 0,98 = 0,95,$$

де $\eta_{\text{н.н.}} = 0,95 \div 0,97$ – ККД клинопасової передачі, $\eta_{\text{н.}} = 0,98$ – ККД підшипників ковзання.

$$\text{Тоді: } N_{\text{дв}} = \frac{17,1}{0,95} = 18 \text{ кВт.}$$

Визначаємо можливі втрати потужності на холостому ході:

$$N_{\text{х.х.}} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot d_{\text{ср}} (n_I + n_{II} + \dots + c \frac{d_{\text{ун}}}{d_{\text{ср}}} n_{\text{ун}}), \quad (2.19)$$

де $d_{cp} \approx 18$ мм - середнє арифметичне значення для Φ усіх опорних шийок валів (крім шпинделя, мм;

d_{um} - середнє арифметичне значення Φ опорних шийок шпинделя, $d_{um} = 110$ мм;

$c = 2$ - для шпинделя, який змонтований на підшипниках ковзання,

$n_I, n_{II}, \dots, n_{um}$ - частоти обертання валів (об/хв.) і шпинделя;

$$n_I = n_{\partial\partial} = 1500 \text{ об/хв}; \quad n_{um} = 1250 \text{ об/хв}$$

Тоді

$$N_{x.x.} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 18 \left(1500 + 2 \cdot \frac{110}{18} \cdot 1250 \right) = 1,208 \text{ кВт}$$

$$\text{Отже: } N_{\partial\partial} = 18 + 1,208 = 19,21 \text{ кВт}$$

Для приводу головного руху по необхідній потужності обираємо двигун 4AP18OS4CY1. Для даного двигуна $n = 1500$ об/хв, $N = 22,0$ кВт.

2. Привід передньої бабки. Для даного приводу необхідна потужність двигуна обирається із умови, що: $P_{Z\partial} = P_{ZKP}$

На рис. 2.9. приведено розрахункову схему шліфування деталі.

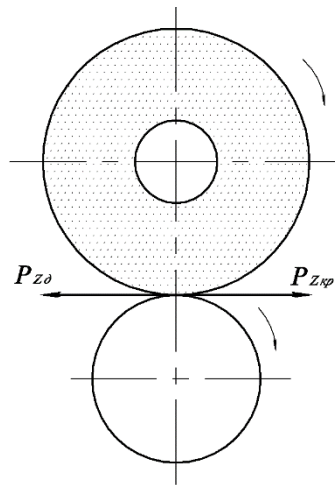


Рис. 2.9. Сили різання, які виникають при шліфуванні

$$P_{ZKP} = \frac{N \cdot 30 \cdot 2 \cdot 1000}{\pi \cdot d_{KP} \cdot n_{KP}} = \frac{17.1 \cdot 30 \cdot 2 \cdot 1000}{3.14 \cdot 0.750 \cdot 1250} = 348.5 \text{ Н} \quad (2.20)$$

$$N_{ДЕТ} = P_{ZД} \cdot \frac{d_{Д}}{2} \cdot \frac{\pi \cdot n_{Д}}{30 \cdot 1000} = \frac{348,5 \cdot 0,427 \cdot 3,14 \cdot 25}{2 \cdot 30 \cdot 1000} = 0,20 \text{ кВт} \quad (2.21)$$

Для приведеної на рис. 2.6 кінематичної схеми приводу передньої бабки ККД становить:

$$\eta = \eta_{n.n.}^{\lambda_1} \cdot \eta_n^{\lambda_2} = 0.97^3 \cdot 0.99^5 = 0.87$$

де $\eta_{n.n.} = 0,96 \div 0,97$ – ККД клинопасової передачі; $\lambda_1 = 3$ - кількість клинопасових передач; $\eta_n = 0,99$ – ККД підшипників кочення; $\lambda_2 = 5$ - кількість пар підшипників.

Виходячи з цього визначаємо потужність електродвигуна:

$$N_{\text{дв}} = \frac{N_{\text{еф}}}{\eta} = \frac{0.20}{0.87} = 0.23 \text{ кВт} \quad (2.22)$$

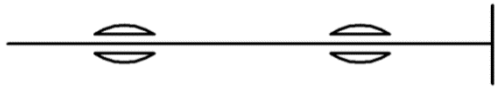
2.6. Розрахунок шпиндельного вузла

Для розрахунку шпиндельного вузла слід спочатку сформулювати технічні вимоги, яким він повинен відповідати. В таблиці 2.4. приведено основні вимоги яким повинен відповідати шпиндель та аналітичні залежності за яким ці вимоги розраховуються.

Таблиця 2.4. Вимоги до шпиндельного вузла

| Назва вимоги | Розрахунковий вираз | Значення |
|--------------------------------|--|---------------------------|
| Точність, Δ | $\Delta \leq \frac{\Delta \partial}{3} = \frac{0,063}{3},$ де Δ - биття шпинделя; $\Delta \partial$ - допуск на виготовлення деталі | 0,021 мм |
| Жорсткість, j | $j \geq \frac{F_{\text{max піз}}}{\Delta} = \frac{53,04}{3},$ де $F_{\text{max піз}}$ – максимальна сила різання | 2525,7 Н/мм |
| Теплостійкість, Δt | Δt | 20 ÷ 30 °C |
| Швидкохідність, $d \cdot n$ | n - величина обертів шпинделя; $n = 1250$ Для шпинделя з зовнішнім приводом $N/d = 0.20 \div 0.35 \text{ кВт/мм}$ $d \geq \sqrt[4]{(0,05 \dots 0,1)l^3} = \sqrt[4]{0,1 \cdot 600^3} = 85 \text{ мм}$ де l – міжопорна відстань, $l = 600 \text{ мм}$ | $1.4 \cdot 10^5$ мм/хв |

На основі отриманого значення параметру швидкохідності шпинделя $d \cdot n = 1.4 \cdot 10^5 \text{ мм/хв}$ та користуючись рекомендаціями [22] обираємо конструктивну схему (рис. 2.10) шпиндельного вузла (ШВ), яка має в передній і задній опорі гідродинамічні підшипники.



$$d \cdot n = 1,4 \cdot 10^5 \text{ мм/хв}$$

Рис. 2.10. Конструктивна схема шпиндельного вузла

Здійснимо вибір геометричних характеристик ШВ:

1. визначаємо \varnothing шпинделя в передній опорі:

$$d \leq \frac{(d \cdot n)_{\text{табл}}}{n_{\text{max}}} = \frac{1,4 \cdot 10^5}{1250} = 112 \text{ мм} \approx 110 \text{ мм} \quad (2.23)$$

2. Фактична міжопорна відстань

$$l = (4 \div 7) \cdot d \quad (2.24)$$

Приймаємо: $l = 5,5 \cdot 110 = 605 \text{ мм} \approx 600 \text{ мм}$

3. \varnothing шпинделя в задній опорі:

$$d_3 (0,7 \div 1)d = 1 \cdot 110 = 110 \text{ мм} \quad (2.25)$$

Приймаємо $d_3 = 110 \text{ мм}$

4. \varnothing шпинделя між опорами:

$$d_M = (0,9 \div 1,1)d = 1,1 \cdot 110 \approx 130 \text{ мм} \quad (2.26)$$

Приймаємо: $d_M = 130 \text{ мм}$

5. Виліт шпинделя:

$$c = (1 \div 2,1) \cdot d = 1,3 \cdot 110 = 143 \text{ мм} \approx 140 \text{ мм} \quad (2.27)$$

Приймаємо $c = 140 \text{ мм}$.

На рис. 2.11 приведено конструкцію опор ковзання з основними розмірами.

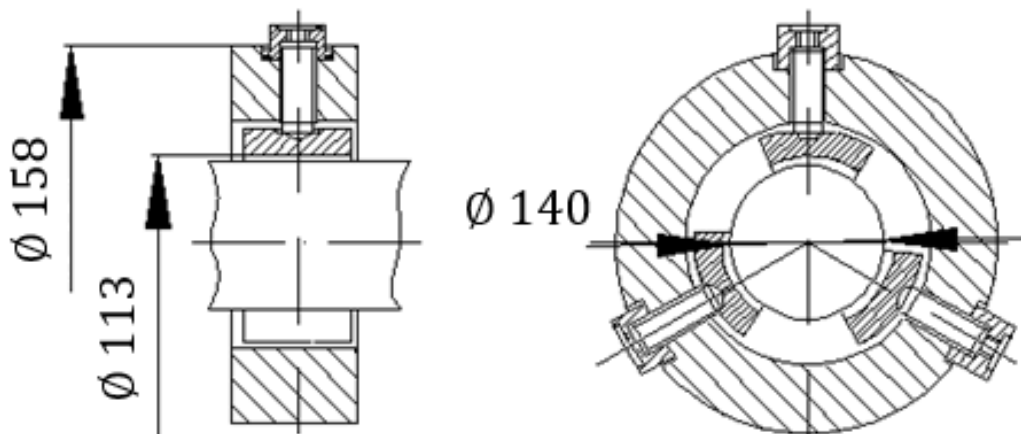


Рис. 2.11. Загальний вид і основні розміри гідродинамічних підшипників

Здійснимо підбір підшипників для опор ШВ

В якості опор для шпинделя шліфувального верстату обираємо два підшипники ковзання спеціальної конструкції. Вони мають по три однакових вкладиші, які своїми сферичними лунками опираються на гвинти з сферичними головками (по них відбувається самовстановлення шпинделя). Конструкція вкладишів забезпечує масляний клин між шийкою шпинделя та вкладишами, це усуває їх нагрів та зношення.

Найкраще використовувати гідродинамічні клинові підшипники, вони здатні забезпечити необхідну жорсткість та точність обертання.

Основні конструктивні параметри для гідродинамічних опор слід визначати виходячи із значення Φ шийки шпинделя.

При цьому довжину вкладиша L в осьовому напрямку та його довжину по дузі B , мм, вибираємо із наступних аналітичних виразів:

$$B = 0,5 \cdot d = 0,5 \cdot 110 = 55 \text{ мм} \quad (2.28)$$

$$L = 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 110 = 82,5 \text{ мм} \quad (2.29)$$

Тоді величина діаметрального зазору буде становити:

$$\Delta = 3 \cdot D \cdot 10^{-4} = 0,033 \text{ мкм} \quad (2.30)$$

де $D = 11 \text{ см}$ – Φ шийки шпинделя.

Далі необхідно вибрати робочу рідину з відповідним коефіцієнтом динамічної в'язкості (μ). Приймаємо мінеральне масло марки Л (велосіт) для якого $\mu = (4 \div 5) \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ при температурі $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Наступним кроком є визначення навантажувальної здатності гідродинамічного підшипника F_d .

Для цього необхідно визначити орієнтовне навантаження на один вкладиш:

$$F_i = \frac{F_0}{1 + E \cos \theta} \quad (2.31)$$

де $E = (2 \cdot e) / \Delta$ - відносний ексцентриситет;

e - ексцентриситет (показує зміщення центра шпинделя від дії зовнішнього навантаження), мкм;

θ – координата точки опори вкладиша відносно напрямку дії зовнішнього навантаження.

Величину навантаження, яке діє на кожен окремих вклади при $e = 0$ визначаємо за виразом:

$$F_O = 0.5 \frac{\mu \cdot n \cdot D \cdot B \cdot L}{\Delta^2} \cdot C_L \quad (2.32)$$

де $C = \frac{1.25}{1 + \frac{B^2}{L^2}} = \frac{1.25}{1 + \frac{55.0^2}{82.5^2}} = 0.87$ - конструктивний коефіцієнт.

$$F_O = 0.5 \frac{\mu \cdot n \cdot D \cdot B \cdot L}{\Delta^2} \cdot C_L = 0.5 \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 1250 \cdot 110 \cdot 55 \cdot 82.5}{0.033^2} \cdot 0.87 = \\ = 9.97 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Звідси навантажувальна здатність підшипника визначається:

$$F_D = \sum_1^k F_i \quad (2.33)$$

де $k = 3$ – число вкладишів.

Для підшипників які можуть містити три вкладиші значення максимальної навантажувальної здатності визначається за виразом:

$$F_{Dmax} = 0,8 \cdot F_O = 0,036 \cdot n \cdot D^2 = 0,036 \cdot 1250 \cdot 110^2 = 54,5 \cdot 10^4 \text{ Н} \quad (2.34)$$

Тому на жорсткість гідродинамічних підшипників має вирішальний вплив не стільки жорсткість шару мащення J_M , як жорсткість елементів спряжених конструкцій $J_{ел}$.

Тоді значення сумарної жорсткості опори:

$$j_{оп} = \frac{J_M \cdot J_{ел}}{J_M + J_{ел}} \quad (2.35)$$

При невеликих навантаженнях в опорах будуть виникати невеликі зміщення, тоді для підшипника з трьома вкладишами отримаємо:

$$J_M = 0,09 \cdot n \cdot d = 0,09 \cdot 1250 \cdot 110 = 1,2 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}$$

Отже жорсткість елементів конструкції при контакті сегментів з опорними поверхнями не перевищує $250 \div 300 \text{ Н/мкм}$.

$$J_{ел} = 125 \cdot d_c^2 = 125 \cdot 25^2 = 7.8 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}$$

де d_c - діаметр опорної напівсфери; $d_c = 15 \div 25 \text{ мм}$.

$$j_{on} = \frac{1,2 \cdot 10^4 \cdot 7,8 \cdot 10^4}{1,2 \cdot 10^4 + 7,8 \cdot 10^4} = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ Н/мм}$$

2.7. Автоматизований розрахунок клинопасових передач приводу

Для автоматизованих розрахунків скористаємось програмою «Комплекс інженерних розрахунків» (рис. 2.12), яка випущена фахівцями МДТУ «Станкін».

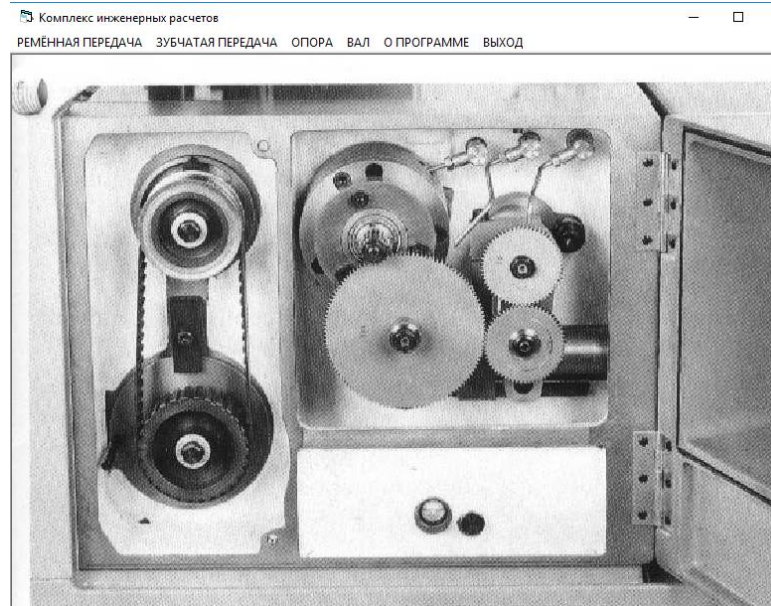


Рис. 2.12. Вітальне вікно програми

На рис. 2.13 приведено вікно попереднього розрахунку для першої клинопасової передачі.

РАСЧЁТ ПЕРЕДАЧ КЛИНОВЫМ РЕМНЁМ

ФАЙЛ РАСЧЁТ СПРАВКА ОФОРМЛЕНИЕ ВЫХОД

| | | | | | |
|--------------------------------------|------|------------------------|------|--|--|
| Мощность передачи (кВт) | 1,6 | Передаточное отношение | 0,38 | ТИПЫ СТАНКОВ | |
| Ном. частота вращения шкива (1/мин) | 150 | Тип станка (1-3) | 1 | 1 - токарные, сверлильные, шлифовальные; | |
| Макс. частота вращения шкива (1/мин) | 1500 | | | 2 - фрезерные, револьверные; | |
| | | | | 3 - долбежные, строгальные | |

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА

| Тип сечения | Б | Б | Б | У0 | У0 | У0 | У0 | У0 | У0 | УА | УА | УА | УА | УА | УА |
|--------------------------------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Расчётная ширина, мм | 14 | 14 | 14 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| Меньший диаметр, мм | 150 | 200 | 250 | 105 | 140 | 180 | 240 | 300 | 400 | 110 | 150 | 200 | 250 | 340 | 450 |
| Большой диаметр, мм | 420 | 560 | 710 | 300 | 380 | 500 | 670 | 850 | 1100 | 300 | 420 | 550 | 710 | 950 | 1300 |
| Передаточное отношение | 0,357 | 0,357 | 0,356 | 0,356 | 0,356 | 0,356 | 0,356 | 0,356 | 0,356 | 0,357 | 0,357 | 0,357 | 0,356 | 0,356 | 0,356 |
| Макс. окружная скорость, м/с | 11,775 | 15,700 | 20,410 | 8,243 | 10,980 | 14,130 | 18,840 | 23,550 | 31,400 | 8,635 | 11,775 | 15,700 | 20,410 | 26,690 | 35,325 |
| Длина ремня, мм | 1600 | 2200 | 2800 | 1150 | 1500 | 1900 | 2500 | 3400 | 4200 | 1200 | 1600 | 2200 | 2800 | 3600 | 5000 |
| Число ремней | 4 | 3 | 2 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 1 | 5 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| Мин. межосевое расстояние, мм | 324,00 | 428,50 | 544,00 | 230,75 | 294,00 | 382,00 | 508,50 | 640,50 | 833,00 | 235,50 | 323,50 | 423,00 | 543,50 | 719,50 | 972,50 |
| Макс. межосевое расстояние, мм | 1140,00 | 1520,00 | 1940,00 | 810,00 | 1040,00 | 1350,00 | 1820,00 | 2300,00 | 3000,00 | 820,00 | 1140,00 | 1520,00 | 1940,00 | 2580,00 | 3500,00 |
| Угол обхвата меньшего шкива | 132 | 132 | 133 | 132 | 133 | 132 | 132 | 131 | 132 | 134 | 132 | 132 | 133 | 132 | 130 |
| Сила начального натяжения, Н | 1998 | 1489,7 | 1158,8 | 2825,2 | 2171,7 | 1658,7 | 1235,4 | 975,7 | 744,7 | 2785,7 | 1995,8 | 1488,4 | 1158 | 870,4 | 641,9 |
| Сила действ. на вал, Н | 2762,2 | 2072,4 | 1593,1 | 3948,3 | 2957 | 2302,4 | 1727,4 | 1382,8 | 1066,2 | 3761,7 | 2762,4 | 2072,5 | 1593,2 | 1219,5 | 922,5 |
| Допускаемое напряжение, МПа | 2,437 | 2,832 | 3,181 | 5,725 | 6,344 | 6,700 | 7,080 | 7,336 | 7,466 | 4,342 | 5,092 | 5,677 | 6,049 | 6,293 | 6,556 |
| Начальное напряжение | 1,600 | 1,600 | 1,600 | 5,515 | 6,166 | 6,424 | 7,240 | 5,809 | 6,678 | 3,693 | 4,341 | 5,115 | 7,048 | 6,028 | 4,502 |
| Ширина шкива, мм | 82,0 | 63,0 | 44,0 | 75,0 | 52,0 | 40,0 | 28,0 | 28,0 | 16,0 | 80,0 | 50,0 | 35,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |

Рис. 2.13. Попередній розрахунок першої клинопасової передачі

На рис. 2.14 приведено результати автоматизованого розрахунку для першої передачі по попередньо обраній міжосьовій відстані.

РАСЧЁТ ПЕРЕДАЧ КЛИНОВЫМ РЕМНЁМ

ФАЙЛ РАСЧЁТ СПРАВКА ОФОРМЛЕНИЕ ВЫХОД

| | | | | |
|--------------------------------------|------|------------------------|------|---|
| Мощность передачи (кВт) | 1,6 | Передаточное отношение | 0,38 | ТИПЫ СТАНКОВ 1 - токарные, сверлильные, шлифовальные; 2 - фрезерные, револьверные; 3 - долбежные, строгальные |
| Ном. частота вращения шкива (1/мин) | 150 | Тип станка (1-3) | 1 | |
| Макс. частота вращения шкива (1/мин) | 1500 | | | |

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА

| Тип сечения | Б | У0 | У0 | УА | УА |
|--------------------------------|---------|--------|---------|--------|---------|
| Расчётная ширина, мм | 14 | 8,5 | 8,5 | 11 | 11 |
| Меньший диаметр, мм | 150 | 105 | 140 | 110 | 150 |
| Большой диаметр, мм | 420 | 300 | 380 | 380 | 420 |
| Передаточное отношение | 0,357 | 0,358 | 0,368 | 0,367 | 0,357 |
| Макс. окружная скорость, м/с | 11,775 | 8,245 | 10,598 | 8,638 | 11,775 |
| Длина ремня, мм | 1880 | 1500 | 1700 | 1500 | 1880 |
| Число ремней | 4 | 5 | 4 | 4 | 3 |
| Мин. межосевое расстояние, мм | 324,00 | 230,75 | 284,00 | 235,50 | 323,50 |
| Макс. межосевое расстояние, мм | 1148,00 | 810,00 | 1048,00 | 828,00 | 1148,00 |
| Расч. межосевое расстояние, мм | 431,43 | 420,78 | 424,85 | 417,34 | 431,43 |
| Угол обхвата меньшего шкива | 144 | 154 | 148 | 154 | 144 |
| Сила начального натяжения, Н | 2301,5 | 3619,6 | 2539,4 | 3688,4 | 2301,5 |
| Сила действ. на вал, Н | 2728,1 | 3851,7 | 2811,6 | 3674,2 | 2728,1 |
| Допускаемое напряжение, МПа | 2,588 | 6,583 | 6,863 | 4,958 | 5,476 |
| Начальное напряжение | 1,600 | 6,142 | 5,865 | 4,314 | 4,358 |
| Ширина шкива, мм | 82,0 | 64,0 | 52,0 | 65,0 | 58,0 |

Рис. 2.14. Розрахунок першої клинопасової передачі по попередньо обраній міжосьовій відстані

Проведемо аналогічні розрахунки для другої ступені пасової передачі, їх результати приведено на рис. 2.15 та рис. 2.16.

РАСЧЁТ ПЕРЕДАЧ КЛИНОВЫМ РЕМНЁМ

ФАЙЛ РАСЧЁТ СПРАВКА ОФОРМЛЕНИЕ ВЫХОД

| | | | | |
|--------------------------------------|-----|------------------------|------|---|
| Мощность передачи (кВт) | 1,6 | Передаточное отношение | 0,42 | ТИПЫ СТАНКОВ 1 - токарные, сверлильные, шлифовальные; 2 - фрезерные, револьверные; 3 - долбежные, строгальные |
| Ном. частота вращения шкива (1/мин) | 150 | Тип станка (1-3) | 1 | |
| Макс. частота вращения шкива (1/мин) | 570 | | | |

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА

| Тип сечения | Б | Б | Б | Б | Б | У0 | У0 | У0 | У0 | У0 | УА | УА | УА | УА | УА |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Расчётная ширина, мм | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| Меньший диаметр, мм | 150 | 200 | 260 | 340 | 450 | 105 | 140 | 180 | 240 | 300 | 110 | 150 | 200 | 280 | 450 |
| Большой диаметр, мм | 380 | 500 | 670 | 850 | 1100 | 260 | 350 | 450 | 600 | 750 | 280 | 380 | 500 | 670 | 1100 |
| Передаточное отношение | 0,395 | 0,400 | 0,388 | 0,400 | 0,409 | 0,400 | 0,389 | 0,400 | 0,400 | 0,400 | 0,393 | 0,395 | 0,400 | 0,388 | 0,409 |
| Макс. окружная скорость, м/с | 4,475 | 5,966 | 7,756 | 10,142 | 13,424 | 3,132 | 4,176 | 5,368 | 7,158 | 8,948 | 3,281 | 4,475 | 5,966 | 7,756 | 10,142 |
| Длина ремня, мм | 1500 | 2000 | 2500 | 3400 | 4500 | 1400 | 1800 | 2400 | 3000 | 3800 | 1100 | 1500 | 2000 | 2600 | 3400 |
| Число ремней | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 6 | 4 | 3 | 2 | 2 | 5 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| Мин. межосевое расстояние, мм | 302,00 | 395,50 | 522,00 | 655,00 | 863,00 | 208,75 | 283,00 | 364,50 | 470,00 | 585,50 | 224,50 | 301,50 | 395,00 | 521,50 | 654,50 |
| Макс. межосевое расстояние, мм | 1060,00 | 1400,00 | 1850,00 | 2380,00 | 3100,00 | 730,00 | 1000,00 | 1260,00 | 1600,00 | 2000,00 | 740,00 | 1060,00 | 1400,00 | 1850,00 | 2380,00 |
| Расч. межосевое расстояние, мм | 137 | 137 | 135 | 135 | 137 | 136 | 136 | 137 | 136 | 136 | 137 | 137 | 137 | 135 | 137 |
| Угол обхвата меньшего шкива | 2115,2 | 1589,9 | 1198,6 | 929,5 | 709,3 | 306,3 | 223,8 | 176,2 | 131,7 | 108,2 | 2093,4 | 2113,2 | 1588,8 | 1197,3 | 929,1 |
| Сила начального натяжения, Н | 2731,9 | 2063,6 | 1389,7 | 1214,4 | 916,9 | 3927,1 | 2951 | 2293,3 | 1720,4 | 1378,5 | 3731,7 | 2752,1 | 2063,7 | 1389,8 | 1214,5 |
| Сила действ. на вал, Н | 2,660 | 2,847 | 3,102 | 3,327 | 3,603 | 5,716 | 6,284 | 6,750 | 7,085 | 7,237 | 4,269 | 5,084 | 5,651 | 6,006 | 6,333 |
| Допускаемое напряжение, МПа | 1,600 | 1,600 | 1,600 | 1,600 | 1,600 | 5,395 | 6,174 | 6,319 | 7,116 | 6,696 | 3,684 | 4,471 | 5,027 | 5,324 | 5,469 |
| Начальное напряжение | 82,0 | 63,0 | 44,0 | 25,0 | 25,0 | 76,0 | 52,0 | 40,0 | 28,0 | 28,0 | 80,0 | 50,0 | 35,0 | 20,0 | 20,0 |
| Ширина шкива, мм | | | | | | | | | | | | | | | |

Рис. 2.15. Попередній розрахунок другої клинопасової передачі

РАСЧЁТ ПЕРЕДАЧ КЛИНОВЫМ РЕМНЁМ

ФАЙЛ РАСЧЁТ СПРАВКА ОФОРМЛЕНИЕ ВЫХОД

| | | | | |
|--------------------------------------|-----|------------------------|------|---|
| Мощность передачи (кВт) | 1,6 | Передаточное отношение | 0,42 | ТИПЫ СТАНКОВ 1 - токарные, сверлильные, шлифовальные; 2 - фрезерные, револьверные; 3 - долбежные, строгальные |
| Ном. частота вращения шкива (1/мин) | 150 | Тип станка (1-3) | 1 | |
| Макс. частота вращения шкива (1/мин) | 570 | | | |

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА

| Тип сечения | Б | Б | 90 | 90 | 90 | 9А | 9А | 9А |
|--------------------------------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
| Расчётная ширина, мм | 14 | 14 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 11 | 11 | 11 |
| Меньший диаметр, мм | 150 | 200 | 105 | 140 | 180 | 110 | 150 | 200 |
| Большой диаметр, мм | 380 | 500 | 250 | 350 | 450 | 280 | 350 | 500 |
| Передаточное отношение | 0,395 | 0,400 | 0,404 | 0,389 | 0,400 | 0,393 | 0,395 | 0,400 |
| Макс. окружная скорость, м/с | 4,475 | 5,966 | 3,132 | 4,176 | 5,369 | 3,281 | 4,475 | 5,966 |
| Длина ремня, мм | 1700 | 2000 | 1400 | 1700 | 1900 | 1500 | 1700 | 2000 |
| Число ремней | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | 3 | 2 |
| Мин. межосевое расстояние, мм | 302,00 | 395,50 | 208,75 | 285,00 | 354,50 | 224,50 | 301,50 | 395,00 |
| Макс. межосевое расстояние, мм | 1060,00 | 1400,00 | 730,00 | 1000,00 | 1280,00 | 780,00 | 1060,00 | 1400,00 |
| Расч. межосевое расстояние, мм | 418,14 | 423,96 | 408,08 | 443,87 | 434,48 | 435,56 | 418,14 | 423,96 |
| Угол обхвата меньшего шкива | 145 | 140 | 158 | 152 | 145 | 158 | 149 | 140 |
| Сила начального натяжения, Н | 2385,4 | 1646,1 | 3600,7 | 2610,8 | 1922,3 | 3429,9 | 2385,4 | 1646,1 |
| Сила, действ. на вал, Н | 2714,5 | 2057,5 | 3824,8 | 2895,3 | 2273,6 | 3858,8 | 2714,5 | 2057,5 |
| Допускаемое напряжение, МПа | 2,601 | 2,877 | 5,561 | 6,946 | 7,003 | 5,009 | 5,472 | 5,711 |
| Начальное напряжение | 1,600 | 1,600 | 6,060 | 5,791 | 6,144 | 4,268 | 4,289 | 4,973 |
| Ширина шкива, мм | 82,0 | 63,0 | 64,0 | 52,0 | 40,0 | 65,0 | 50,0 | 35,0 |

Рис. 2.16. Розрахунок другої клинопасової передачі по попередньо обраний міжосьовій відстані

Проведемо аналогічні розрахунки для третьої ступені пасової передачі, їх результати приведено на рис. 2.17 та рис. 2.18.

РАСЧЁТ ПЕРЕДАЧ КЛИНОВЫМ РЕМНЁМ

ФАЙЛ РАСЧЁТ СПРАВКА ОФОРМЛЕНИЕ ВЫХОД

| | | | | |
|--------------------------------------|-----|------------------------|-----|---|
| Мощность передачи (кВт) | 1,6 | Передаточное отношение | 0,4 | ТИПЫ СТАНКОВ 1 - токарные, сверлильные, шлифовальные; 2 - фрезерные, револьверные; 3 - долбежные, строгальные |
| Ном. частота вращения шкива (1/мин) | 150 | Тип станка (1-3) | 1 | |
| Макс. частота вращения шкива (1/мин) | 240 | | | |

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА

| Тип сечения | Б | Б | Б | Б | Б | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 9А | 9А | 9А | 9А | 9А |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Расчётная ширина, мм | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| Меньший диаметр, мм | 150 | 200 | 260 | 340 | 450 | 105 | 140 | 180 | 240 | 300 | 110 | 150 | 200 | 260 | 340 |
| Большой диаметр, мм | 400 | 530 | 670 | 900 | 1150 | 280 | 350 | 480 | 630 | 800 | 300 | 400 | 530 | 670 | 900 |
| Передаточное отношение | 0,375 | 0,377 | 0,388 | 0,378 | 0,391 | 0,375 | 0,389 | 0,375 | 0,389 | 0,375 | 0,367 | 0,375 | 0,377 | 0,388 | 0,378 |
| Макс. окружная скорость, м/с | 1,884 | 2,512 | 3,266 | 4,270 | 5,652 | 1,319 | 1,758 | 2,261 | 3,014 | 3,768 | 1,382 | 1,884 | 2,512 | 3,266 | 4,270 |
| Длина ремня, мм | 1600 | 2100 | 2600 | 3600 | 4500 | 1100 | 1400 | 1900 | 2500 | 3200 | 1200 | 1500 | 2100 | 2600 | 3600 |
| Число ремней | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 6 | 4 | 3 | 2 | 2 | 5 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| Мин. межосевое расстояние, мм | 313,00 | 412,00 | 522,00 | 692,50 | 890,50 | 219,75 | 285,00 | 371,00 | 486,50 | 613,00 | 235,50 | 312,50 | 411,50 | 521,50 | 692,00 |
| Макс. межосевое расстояние, мм | 1100,00 | 1450,00 | 1850,00 | 2480,00 | 3200,00 | 770,00 | 1000,00 | 1320,00 | 1740,00 | 2200,00 | 820,00 | 1100,00 | 1450,00 | 1850,00 | 2480,00 |
| Угол обхвата меньшего шкива | 134 | 134 | 135 | 134 | 135 | 135 | 135 | 134 | 134 | 134 | 134 | 134 | 134 | 134 | 135 |
| Сила начального натяжения, Н | 2086,1 | 1539,3 | 1198,6 | 899,9 | 692,2 | 2942,9 | 2239,8 | 1698,8 | 1282,1 | 1014 | 2785,7 | 2086,1 | 1539,3 | 1197,9 | 899,5 |
| Сила, действ. на вал, Н | 2757,4 | 2088,3 | 1600,7 | 1217,1 | 918,5 | 3938,7 | 2951 | 2299 | 1723,6 | 1378,9 | 3781,7 | 2757,4 | 2088,3 | 1589,8 | 1217,2 |
| Допускаемое напряжение, МПа | 2,465 | 2,840 | 3,102 | 3,318 | 3,475 | 5,721 | 6,295 | 6,742 | 7,091 | 7,316 | 4,340 | 5,130 | 5,685 | 6,007 | 6,362 |
| Начальное напряжение | 1,600 | 1,600 | 1,600 | 1,600 | 1,600 | 5,457 | 6,134 | 6,383 | 7,170 | 5,754 | 3,633 | 4,307 | 5,072 | 5,777 | 5,977 |
| Ширина шкива, мм | 82,0 | 63,0 | 44,0 | 25,0 | 25,0 | 75,0 | 52,0 | 40,0 | 28,0 | 28,0 | 80,0 | 50,0 | 35,0 | 20,0 | 20,0 |

Рис. 2.17. Попередній розрахунок третьої клинопасової передачі

| | | | | | | |
|--------------------------------------|---------|------------------------|---------|--|--------|---------|
| Мощность передачи (кВт) | 1,6 | Передаточное отношение | 0,4 | ТИПЫ СТАНКОВ | | |
| Ном. частота вращения шкива (1/мин) | 150 | Тип станка (1-3) | 1 | 1 - токарные, сверлильные, шлифовальные; | | |
| Макс. частота вращения шкива (1/мин) | 240 | | | 2 - фрезерные, револьверные; | | |
| | | | | 3 - долбежные, строгальные | | |
| РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА | | | | | | |
| Тип сечения | Б | У0 | У0 | У0 | УА | УА |
| Расчётная ширина, мм | 14 | 6,5 | 6,5 | 6,5 | 11 | 11 |
| Меньший диаметр, мм | 150 | 195 | 140 | 180 | 110 | 150 |
| Большой диаметр, мм | 400 | 280 | 360 | 480 | 300 | 400 |
| Передаточное отношение | 0,375 | 0,375 | 0,389 | 0,375 | 0,367 | 0,375 |
| Макс. окружная скорость, м/с | 1,884 | 1,319 | 1,758 | 2,261 | 1,382 | 1,884 |
| Длина ремня, мм | 1900 | 1500 | 1700 | 1900 | 1500 | 1800 |
| Число ремней | 4 | 5 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| Мин. межосевое расстояние, мм | 313,00 | 219,75 | 263,00 | 371,00 | 235,50 | 312,50 |
| Макс. межосевое расстояние, мм | 1100,00 | 770,00 | 1000,00 | 1320,00 | 820,00 | 1100,00 |
| Расч. межосевое расстояние, мм | 450,32 | 439,06 | 443,87 | 494,06 | 417,34 | 450,32 |
| Угол обхвата меньшего шкива | 148 | 157 | 152 | 138 | 154 | 148 |
| Сила начального натяжения, Н | 2380,9 | 3585,9 | 2610,8 | 1785,8 | 3368,4 | 2380,9 |
| Сила, действ. на вал, Н | 2715,4 | 3830,6 | 2895,3 | 2290,8 | 3674,2 | 2715,4 |
| Допускаемое напряжение, МПа | 2,622 | 6,853 | 6,948 | 6,837 | 4,956 | 5,949 |
| Начальное напряжение | 1,600 | 6,076 | 5,791 | 6,294 | 4,314 | 4,282 |
| Ширина шкива, мм | 82,0 | 64,0 | 52,0 | 40,0 | 85,0 | 60,0 |

Рис. 2.18. Розрахунок третьої клинопасової передачі по попередньо обраній міжосьовій відстані

2.8. Висновки по розділу

В другому розділі кваліфікаційної роботи проведено вибір маршруту обробки деталі «Шестерня МБК34М4568». Здійснено проектний розрахунок режимів різання на шліфувальну операцію.

Провівши аналіз технологічного процесу виготовлення деталі розглянуто теоретично можливі варіанти формоутворення. Це дозволило розробити структурно-кінематичну та кінематичну схеми верстата.

Здійснено розрахунок гідродинамічних клинових підшипників, визначено їх геометричний розрахунок.

За допомогою програми «Комплекс інженерних розрахунків» здійснено автоматизований розрахунок клинопасової передачі (для I-III ступенів).

РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1. Методика та план проведення наукових досліджень

В науково-дослідній частині потрібно здійснити представлення верстата як системи та виявити основні функції складових вузлів верстата. На основі основних положень теорії систем та методу структурних матриць скласти узагальнену граф-модель шліфувального верстату та виявити які фактори визначають точність верстата.

Використовуючи метод морфологічного аналізу розробити перспективні варіанти компоновань верстатів. На основі математичного апарату методу парних порівнянь вибрати оптимальну компоновку для якої провести дослідження точності. Для цього найкраще скористатися основними положеннями векторного балансу точності.

3.2. Представлення шліфувального верстату як системи

Спеціальний шліфувальний верстат доцільно представити у вигляді складної ТС, що містить окремі системи (детально див. рис. 1.1). Верстат можна представити через декартовий добуток трьох складових елементів, відношень та властивостей [17].

$$TS = E \times F \times P \quad (3.1)$$

При такому представленні компоненти шліфувального верстату є множиною його елементів $E = \{e_1, \dots, e_i\}$, а відношення $F = \{f_1, \dots, f_i\}$ – показують як ці елементи між собою взаємодіють, а властивості $P = \{p_1, \dots, p_i\}$ – які функції при цьому виконуються.

Для представлення верстату як системи слід застосовувати розбиття системи на п'ять підсистем, а саме обробки, маніпулювання, керування, контролю та обслуговування. На рис. 3.1 показано як ці підсистеми взаємодіють між собою.

Структуру верстата представлено у вигляді графа (рис. 3.1), вершинами якого є складові компоненти, а ребра – показують зв'язки, що існують між ними.

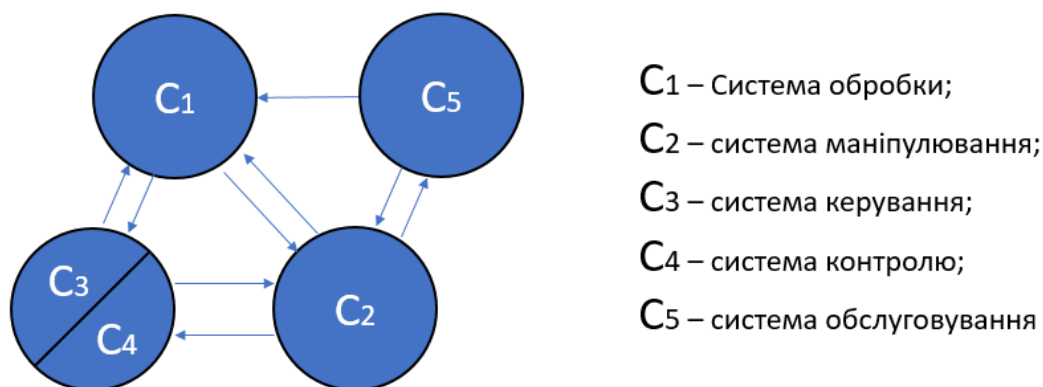


Рис. 3.1. Граф структури шліфувального верстата

Проведемо аналіз кожної системи шліфувального верстата з точки зору функцій, що виконують її складові елементи. Так на рис. 3.2. представлено функціональну схему системи обробки. Процес обробки можна представити через взаємодію між собою заготовки та інструменту.



Рис. 3.2. Функціональна схема системи обробки шліфувального верстату

На рис. 3.3. представлено функціональну схему системи маніпулювання шліфувального верстату. Система маніпулювання відповідає за правильне розміщення заготовки та інструменту в процесі обробки..



Рис. 3.3. Функціональна схема системи маніпулювання шліфувального верстату

На рис. 3.4. представлено функціональну схему системи контролю шліфувальним верстатом. Система контролю здійснює контроль положення та стану робочих вузлів та технологічного оснащення на верстаті.



Рис. 3.4. Функціональна схема системи контролю шліфувального верстату

На рис. 3.5. представлено функціональну схему системи керування. Система керування здійснює управління системою контролю та власне керує процесом обробки, а також системою обслуговування верстатом.

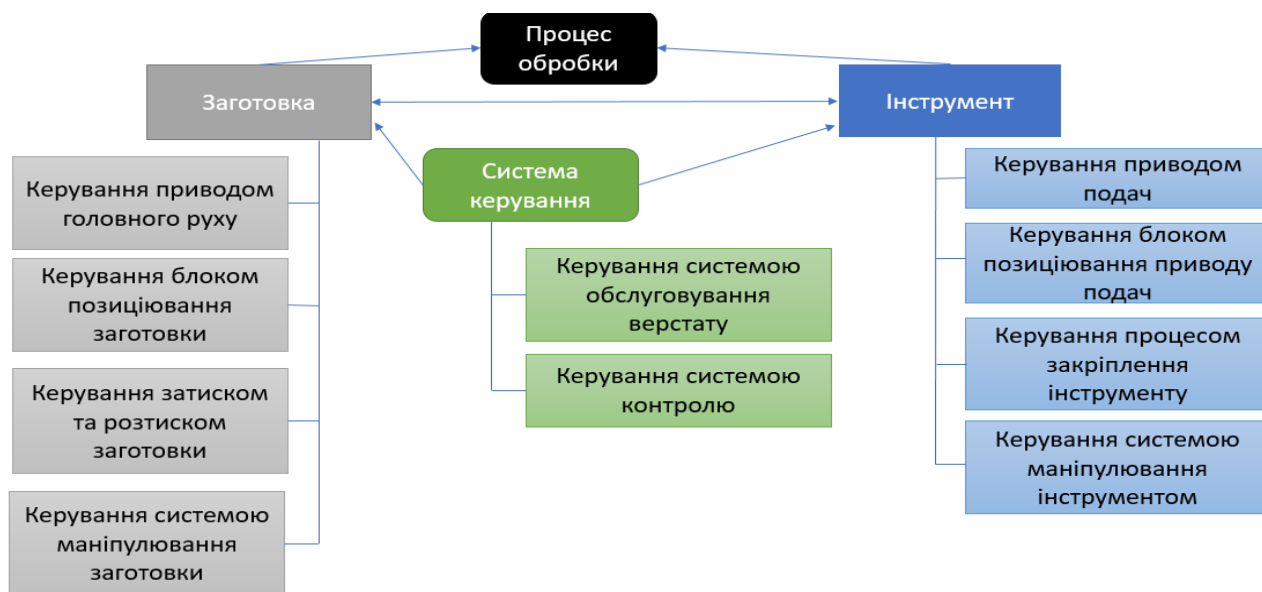


Рис. 3.5. Функціональна схема системи керування шліфувальним верстатом

На рис. 3.6. представлено функціональну схему обслуговування шліфувальним верстатом. Вона забезпечує розміщення вузлів та відповідає за сервісні функції в процесі обробки (подача МОР, змащування вузлів, видалення стружки, тощо).



Рис. 3.6. Функціональна схема системи обслуговування шліфувальним верстатом

Проведемо розподіл систем на елементи, та проведемо аналіз функцій які вони виконують, а результати зводимо в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Аналіз функцій, що виконують блоки та вузли верстата

| Система | Назва блоку чи підсистеми | Опис функцій блоку чи підсистеми |
|---------------------------------|---|--|
| 1 | 2 | 3 |
| Обробки (C ₁) | E ₁ - Заготовки | Φ ₁ ¹ - закріплення заготовки Φ ₁ ² - обертання заготовки з заданою швидкістю |
| | E ₂ - Кінематичного зв'язку приводу головного руху | Φ ₂ ¹ - передача блоку заготовки робочих рухів (обертowego або поступального) |
| | E ₃ - Приводу головного руху | Φ ₃ ¹ - перетворення вхідної енергії в механічну Φ ₃ ² - передача необхідної потужності до органів обертання Φ ₃ ³ -забезпечення діапазону частот обертання |
| | E ₄ – Інструменту | Φ ₄ ¹ - закріплення інструменту |
| | E ₅ – Подач | Φ ₅ ¹ - забезпечення заданого закону переміщення (по осях X,Y,Z чи їх комбінації) |
| | E ₆ – Кінематичного зв'язку приводу подач | Φ ₆ ¹ - переміщення блоку заготовок з заданою швидкістю |
| | E ₇ - Приводу подач | Φ ₇ ¹ - перетворення вхідної енергії в механічну |
| | E ₈ – Позиціювання блоку інструменту | Φ ₈ ¹ - висока чутливість до малих переміщень |
| | E ₉ – Привід позиціювання блоку інструменту | Φ ₉ ¹ - забезпечення лінійних переміщень механізмів при позиціюванні блоку інструментів |
| Маніпулювання (C ₂) | E ₁₀ – Маніпулювання заготовкою | Φ ₁₀ ¹ - подача заготовки в місце обробки Φ ₁₀ ² - затиск заготовки в заданій позиції Φ ₁₀ ³ - зняття заготовки в заданій позиції Φ ₁₀ ⁴ - відвід готових деталей з робочої зони |
| | E ₁₁ – Маніпулювання інструментом | Φ ₁₁ ¹ - подача круга в місце обробки Φ ₁₁ ² - закріплення круга Φ ₁₁ ³ - заміна круга Φ ₁₁ ⁴ - зберігання круга Φ ₁₁ ⁵ - переміщення круга до місця контролю та правки |
| Керування (C ₃) | E ₁₂ – Системи керування | Φ ₁₂ ¹ - керування приводом головного руху Φ ₁₂ ² - керування закріпленням заготовки Φ ₁₂ ³ - керування системою маніпулювання заготовки Φ ₁₂ ⁴ - керування приводом подач Φ ₁₂ ⁵ - керування блоком позиціювання інструментом |

продовження таблиці 3.1.

| 1 | 2 | 3 |
|--------------------------------|---|---|
| Керування (С ₃) | Е ₁₂ – Системи керування | <p>Φ₁₂⁶- керування процесом закріплення інструменту</p> <p>Φ₁₂⁷- керування системою маніпулювання інструментом</p> <p>Φ₁₂⁸- керування обслуговуючою системою верстата</p> <p>Φ₁₂⁹- керування системою контролю верстата</p> |
| Контролю (С ₄) | Е ₁₃ – Блок системи контролю | <p>Φ₁₃¹- контроль стану вузлів верстату до і в процесі обробки</p> <p>Φ₁₃²- контроль положення виходу робочих органів в висхідну точку</p> <p>Φ₁₃³- контроль повернення робочих органів в задане положення після закінчення обробки</p> <p>Φ₁₃⁴- контроль наявності інструменту до початку циклу обробки</p> <p>Φ₁₃⁵- контроль положення, стану та розмірів інструменту</p> <p>Φ₁₃⁶- діагностика інструменту в процесі обробки</p> <p>Φ₁₃⁷- контроль інструменту під час переривання циклу</p> <p>Φ₁₃⁸- контроль степені зношення кругу</p> <p>Φ₁₃⁹- контроль наявності заготовки до початку циклу обробки</p> <p>Φ₁₃¹⁰- контроль положення та надійності кріплення заготовки до і в процесі обробки</p> <p>Φ₁₃¹¹- контроль розмірів заготовки під час переривання циклу</p> <p>Φ₁₃¹²- контроль всіх розмірів та перевірка якості поверхні заготовки після закінчення обробки</p> |
| Обслуговуюча (С ₅) | Е ₁₄ – Підсистема охолодження | Φ ₁₄ ¹ - подавання мастильно-охолоджувальної рідини в робочу зону верстата |
| | Е ₁₅ - Підсистема змащування | Φ ₁₅ ¹ - подання мастильного матеріалу до поверхонь тертя |
| | Е ₁₆ – Підсистема видалення стружки | Φ ₁₆ ¹ – видалення стружки з робочої зони верстата |
| | Е ₁₇ – Несуча система верстата (станина) | <p>Φ₁₇¹ – забезпечення необхідного розміщення і напрямку руху блоку заготовки</p> <p>Φ₁₇² – забезпечення необхідного розміщення і напрямку руху блоку інструменту</p> |

Для подальшого аналізу скористаємось основними положеннями методу структурних матриць [41]. На основі даних розміщених в табл. 3.1 будуємо матрицю суміжності 17 на 17. Нижній та верхній індекси опису функцій вказують між якими блоками існує зв'язок.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 1 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | 1 | - | 1 | 1 | 1 | - | 1 | 1 |
| 2 | 1 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - |
| 4 | - | - | - | - | 1 | - | - | 1 | - | - | 1 | 1 | 1 | 1 | - | 1 | 1 |
| 5 | - | - | - | 1 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 6 | - | - | - | - | 1 | - | 1 | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - |
| 7 | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - |
| 8 | - | - | - | 1 | - | - | - | - | 1 | - | - | 1 | - | - | - | - | - |
| 9 | - | - | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - |
| 10 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | 1 | - | - | - | - |
| 11 | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | 1 | 1 | - | - | - | - |
| 12 | 1 | - | 1 | 1 | - | - | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | 1 | - | 1 | - | - |
| 13 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | 1 | 1 | - | - | - | - | - |
| 14 | 1 | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 15 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - |
| 16 | 1 | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | 1 |
| 17 | 1 | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | - |

(3.2)

Для кращого сприйняття матриці проведемо її перетворення відносно нульової діагоналі. Одиниці слід записати максимально близько по відношенню до нульової діагоналі матриці, що дозволить здійснити групування блоків, які взаємопов'язані між собою.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 9 | 8 | 4 | 5 | 6 | 7 | 10 | 13 | 12 | 11 | 17 | 16 | 14 | 15 |
| 1 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | - |
| 2 | 1 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - |
| 9 | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - |
| 8 | - | - | - | 1 | - | 1 | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - |
| 4 | - | - | - | - | 1 | - | 1 | - | - | - | 1 | 1 | - | 1 | 1 | 1 | - |
| 5 | - | - | - | - | - | 1 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 6 | - | - | - | - | - | - | 1 | - | 1 | - | - | 1 | - | - | - | - | - |
| 7 | - | - | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - |
| 10 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | 1 | - | - | - | - | - |
| 13 | 1 | - | - | - | - | 1 | - | - | - | 1 | - | 1 | 1 | - | - | - | - |
| 12 | 1 | - | 1 | 1 | 1 | 1 | - | 1 | 1 | 1 | 1 | - | 1 | - | - | - | 1 |
| 11 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | 1 | - | 1 | - | - | - |
| 17 | 1 | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - | 1 | - | 1 | - | - |
| 16 | 1 | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - | 1 | - | 1 | - | - | - |
| 14 | 1 | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 15 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - |

(3.3)

Наступним кроком є побудова зваженого мультиграфа структури шліфувального верстату (рис. 3.7). До його складу входять активні та пасивні елементи. Активними вважаємо ті блоки які приймають безпосередню участь в процесі обробки деталі, інші блоки віднесемо до пасивних. Так пасивними блоками є елементи системи керування та контролю та обслуговуючої системи.

Такий підхід дозволяє визначити як складові компоненти шліфувального верстату взаємодіють між собою. Представлення системи шліфувального верстату за допомогою матриці суміжності дозволяє здійснити аналіз значної кількості компонок верстата.

Використання представленого вище підходу дозволяє визначити які компоненти та вузли системи впливають на точність шліфувального верстата.

Як відомо, блок заготовки (E_1) виконує такі функції: закріплення заготовки та здійснення її обертання. Він взаємодіє з блоками ($E_1, E_{10}, E_{12}, E_{17}$). Точність закріплення заготовки на шліфувальному верстаті можна виразити через функцію:

$$\delta = \delta(\delta_{перед}, \delta_{закр.заг}, \delta_{сис.кер}, \delta_{нес.сис.}) \quad (3.4)$$

де $\delta_{перед}$ – похибка блоку кінематичного зв'язку (її можна вважати похибкою обертання шпинделя).

$\delta_{закр.заг}$ – похибка закріплення заготовки;

$\delta_{несис}$ – похибка несучої системи верстата;

$\delta_{сис.кер}$ – похибка системи керування.

Розрахувавши дані похибки ми можемо визначити точність закріплення заготовки на шліфувальному верстаті.

3.3. Використання методу морфологічного аналізу для розробки конструювань шліфувального верстату

Для активізації творчого пошуку доцільним є використання методу морфологічного аналізу, який є одним із прикладів використання системного підходу при вирішенні складних творчих задач [16].

Нам необхідно розробити конструкцію шліфувального верстата з можливістю обробки циліндричних та торцевих поверхонь.

Розробимо морфологічну матрицю для шліфувальних верстатів, представимо її у вигляді таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Морфологічна матриця шліфувальних верстатів

| Шліфувальна бабка | | | 4. Привід головного руху | 5. Пристрій для правки круга | 6. Допоміжний пристрій |
|-----------------------------------|---------------------------------|--|--------------------------------------|------------------------------|--|
| 1. Шпиндель | 2. Шліфувальний круг | 3. Рухи | | | |
| 1.1. На 2 гідродинамічних опорах | 2.1. Основний і допоміжний | 3.1. Обертовий | 4.1. Мотор-шпиндель | 5.1. Нерухомий | 6.1. Координатні тиски |
| 1.2. На двох комбінованих опорах | 2.2. Один круг | 3.2. Обертовий і зворотно-поступальний | 4.2. Двигун - клинопасова передача | 5.2. Відкидний | 6.2. Пристосування для внутрішнього шліфування |
| 1.3. На 2 гідростатичних опорах | 2.3. Чашкоподібний круг | 3.3. Обертовий і 2 зворотно-поступальних | 4.3. Двигун – ланцюгова передача | 5.3. Немає | 6.3. Магнітна плита |
| 1.4. На 2 опорах кочення | 2.4. 2 круги (чашкоподібних) | 3.4. Обертовий і 3 зворотно-поступальних | 4.4. Двигун – гітара зубчастих коліс | | 6.4. Немає |
| 1.5. На 3 опорах кочення | 2.5. Звичайний та чашкоподібний | 3.5. Зворотно-поступальний | 4.5. Гідравлічний привід | | |
| 1.6. На опорах кочення і ковзання | 2.6. Один спеціальний | 3.6. Два обертових | 4.6. Інший механізм | | |

Наступним етапом є генерація альтернатив варіантів конструкцій. Приведена матриця дозволяє отримати 15552 теоретично можливих варіанти шліфувального верстату. З приведених комбінацій обираємо п'ять, а саме:

1.2 – 2.1 – 3.3 – 4.2 – 5.1 – 6.1

1.1 – 2.1 – 3.4 – 4.2 – 5.2 – 6.4

1.1 – 2.6 – 3.2 – 4.2 – 5.1 – 6.4

1.6 – 2.4 – 3.3 – 4.2 – 5.1 – 6.4

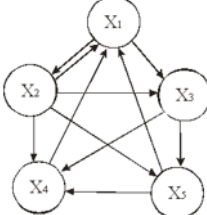
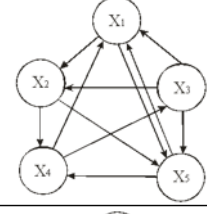
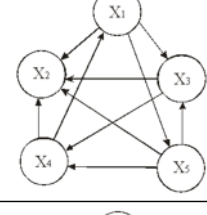
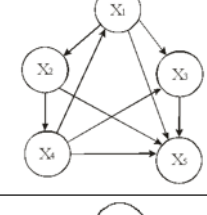
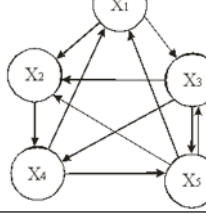
1.3 – 2.2 – 3.3 – 4.2 – 5.1 – 6.4

Використовуючи основні теоретичні положення методу парних порівнянь [16] здійснюємо аналіз та вибір оптимальної конструкції шліфувального верстату із запропонованих вище. Метод передбачає попарне порівняння об'єктів за принципом: «краще» або більше (>); «погано» або менше (<); «однаково» або рівно (=), а також використання спеціального алгоритму обробки даних.

Для аналізу обираємо п'ять критеріїв, в дужках вказано їх вагу: якість (0,3), продуктивність (0,25), вартість (0,18), технологічні можливості (0,15), габарити верстата (0,12). Їх сума становить 1.

В таблиці 3.3 приведено узагальнені результати порівняння.

Таблиця 3.3. Результати вибору оптимального варіанту компоновки за обраними критеріями порівняння

| Критерій порівняння | Отриманий граф турніру | Матриця порівняння | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|-------|-----|
| | | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₅ | $\sum a_{ij}$ | P ₁ ^{в(1)} | P ₁ (2) | P ₁ ^{в(2)} | Місце | |
| Якості |  | | | | | | | | | | | |
| | | X ₁ | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0,08 | 8 | 0,09 | III |
| | | X ₂ | 1 | 1 | 0 | 2 | 2 | 6 | 0,24 | 24 | 0,27 | II |
| | | X ₃ | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 9 | 0,36 | 41 | 0,46 | I |
| | | X ₄ | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0,12 | 7 | 0,08 | V |
| | | X ₅ | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 5 | 0,2 | 9 | 0,10 | IV |
| | | | | | | 25 | 1,00 | 89 | 1,00 | | | |
| Продуктивність |  | | | | | | | | | | | |
| | | X ₁ | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 4 | 0,16 | 18 | 0,15 | IV |
| | | X ₂ | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 | 5 | 0,2 | 23 | 0,19 | III |
| | | X ₃ | 2 | 2 | 1 | 0 | 2 | 7 | 0,28 | 33 | 0,28 | I |
| | | X ₄ | 2 | 0 | 2 | 1 | 0 | 5 | 0,2 | 27 | 0,23 | II |
| | | X ₅ | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 4 | 0,16 | 18 | 0,15 | IV |
| | | | | | | 25 | 1,00 | 119 | 1,00 | | | |
| Собіваргості |  | | | | | | | | | | | |
| | | X ₁ | 1 | 2 | 2 | 0 | 2 | 7 | 0,28 | 33 | 0,33 | I |
| | | X ₂ | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,04 | 1 | 0,01 | V |
| | | X ₃ | 0 | 2 | 1 | 2 | 0 | 5 | 0,2 | 17 | 0,17 | IV |
| | | X ₄ | 2 | 2 | 0 | 1 | 0 | 5 | 0,2 | 21 | 0,21 | III |
| | | X ₅ | 0 | 2 | 2 | 2 | 1 | 7 | 0,28 | 29 | 0,28 | II |
| | | | | | | 25 | 1,00 | 101 | 1,00 | | | |
| Технологічні можливості |  | | | | | | | | | | | |
| | | X ₁ | 1 | 2 | 2 | 0 | 2 | 7 | 0,28 | 29 | 0,32 | I |
| | | X ₂ | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 7 | 0,28 | 29 | 0,32 | I |
| | | X ₃ | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 3 | 0,12 | 5 | 0,05 | III |
| | | X ₄ | 2 | 0 | 2 | 1 | 2 | 7 | 0,28 | 28 | 0,30 | II |
| | | X ₅ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0,04 | 1 | 0,01 | IV |
| | | | | | | 25 | 1,00 | 92 | 1,00 | | | |
| Габаритні розміри |  | | | | | | | | | | | |
| | | X ₁ | 1 | 2 | 2 | 0 | 0 | 5 | 0,2 | 23 | 0,20 | III |
| | | X ₂ | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 3 | 0,12 | 13 | 0,11 | IV |
| | | X ₃ | 0 | 2 | 1 | 2 | 1 | 6 | 0,24 | 23 | 0,20 | III |
| | | X ₄ | 2 | 0 | 0 | 1 | 2 | 5 | 0,2 | 27 | 0,24 | II |
| | | X ₅ | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 | 6 | 0,24 | 28 | 0,25 | I |
| | | | | | | 25 | 1,00 | 114 | 1,00 | | | |

Визначимо найкращий варіант з врахуванням ваги кожного з обраних критеріїв:

$$X_1 = 0,09 \cdot 0,3 + 0,15 \cdot 0,25 + 0,33 \cdot 0,18 + 0,32 \cdot 0,15 + 0,2 \cdot 0,12 = 0,1959,$$

$$X_2 = 0,27 \cdot 0,3 + 0,19 \cdot 0,25 + 0,01 \cdot 0,18 + 0,32 \cdot 0,15 + 0,11 \cdot 0,12 = 0,1915,$$

$$X_3 = 0,46 \cdot 0,3 + 0,28 \cdot 0,25 + 0,17 \cdot 0,18 + 0,05 \cdot 0,15 + 0,20 \cdot 0,12 = 0,2701,$$

$$X_4 = 0,08 \cdot 0,3 + 0,23 \cdot 0,25 + 0,21 \cdot 0,18 + 0,30 \cdot 0,15 + 0,24 \cdot 0,12 = 0,1931,$$

$$X_5 = 0,10 \cdot 0,3 + 0,15 \cdot 0,25 + 0,28 \cdot 0,18 + 0,01 \cdot 0,15 + 0,25 \cdot 0,12 = 0,1494.$$

За сумою критеріїв найкращим варіантом є варіант X₁.

3.4. Моделювання точності обробки циліндричної поверхні на спеціальному шліфувальному верстаті

3.4.1. Рівняння оброблюваної поверхні у формоутворюючому вигляді

Під формоутворюючою системою верстата (ФУСВ) розуміють сукупність базових вузлів, їх взаємне розміщення. При здійсненні їх переміщення забезпечується необхідна траєкторія руху інструменту відносно заготовки.

При моделюванні ФУСВ використовують два види кодів [13]:

- координатний код,
- швидкісний код.

Координатний код дозволяє однозначно відтворити функції формоутворення. При його формуванні початковою ланкою є заготовка, яка у відносному русі є нерухомою, і їй надається індекс – 0. Як правило, із заготовкою пов'язують систему координат S_0 . Кінцевою ланкою є інструмент, з якою пов'язують систему координат S_L .

Дослідження будемо проводити для компоновання верстату приведенного на рис. 3.9.

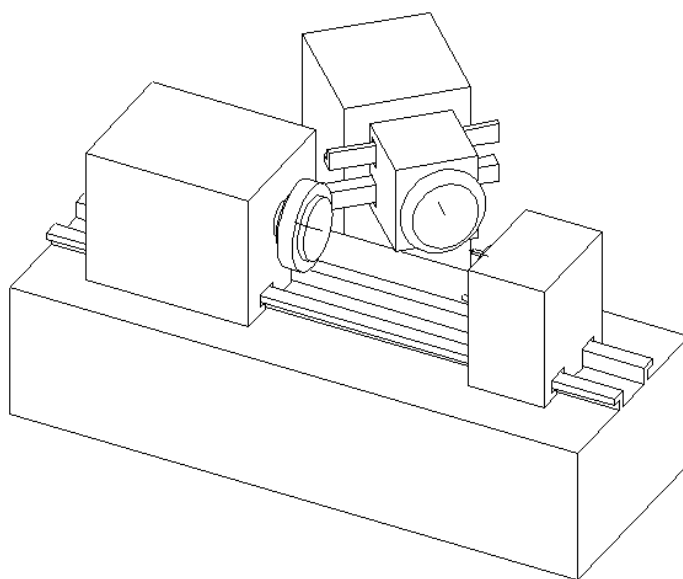


Рис. 3.9. Компоновання спеціального шліфувального верстата

Запишемо математичну модель ФУСВ для шліфувального верстату.

$$\bar{r}_0 = A_{0,l} \cdot \bar{r}_l \quad (3.5)$$

Для нашого шліфувального верстату маємо:

$$K = 6314; \quad l = 4$$

В результаті ми отримаємо:

$$\bar{r}_0 = A_{0,1}^6 \cdot A_{1,2}^3 \cdot A_{2,3}^1 \cdot A_{3,4}^4 \cdot \bar{r}_4 \quad (3.6)$$

де $\bar{r}_4 = A^6(\phi_2) \cdot A^1(R) \cdot A^3(z_2) \cdot e^{-4}$ - радіус-вектор формоутворюючих точок інструменту.

Нижче записані матриці які дозволяють описати складові формоутворюючого коду шліфувального верстату.

$$A_{0,1}^6 = \begin{vmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} - \text{обертвий рух навколо осі } z,$$

$$A_{1,2}^3 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} - \text{повздовжній рух вздовж осі } z,$$

$$A_{2,3}^1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} - \text{повздовжній рух вздовж осі } x,$$

$$A_{3,4}^4 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_1 & -\sin \phi_1 & 0 \\ 0 & \sin \phi_1 & \cos \phi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} - \text{обертвий рух навколо осі } x.$$

Оскільки ріжучим інструментом є шліфувальний круг, то для нього будемо мати:

$$\bar{r}_4 = A^4(\phi_2) \cdot A^1(R) \cdot A^3(z_2) \cdot e^{-4} \quad (3.7)$$

$$A^4(\phi_2) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_2 & -\sin \phi_2 & 0 \\ 0 & \sin \phi_2 & \cos \phi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A^1(R) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & R \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad A^3(z_2) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Проведемо перетворення:

$$A^4(\phi_1) \cdot A^4(\phi_2) = A^4(\phi_1 + \phi_2) = A^4(\theta),$$

де $\theta = \phi_1 + \phi_2$

$$A^3(z_1) \cdot A^3(z_2) = A^3(z_1 + z_2) = A^3(z),$$

де $z = z_1 + z_2$.

З врахуванням вищевказаного отримаємо:

$$\bar{r}_0 = \begin{vmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & R \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(\phi + \theta)R + \cos \phi \cdot x \\ \sin(\phi + \theta)R + \sin \phi \cdot x \\ z \\ 1 \end{vmatrix}$$

3.4.2. Векторний баланс точності в нормальному напрямку

Знайдемо одиничний вектор нормалі до поверхні в точці заданій радіус-вектором \bar{r}_0 . Для цього визначимо шуканні змінні про диференціювавши \bar{r}_0 відповідно по ϕ , θ , z , x .

В результаті ми отримаємо:

$$\frac{\partial \bar{r}_0}{\partial \theta} = \begin{vmatrix} +(-\cos \phi \sin \theta - \sin \phi \cos \theta)R \\ (\sin \phi \sin \theta - \cos \phi \cos \theta)R \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$\frac{\partial \bar{r}_0}{\partial \phi} = \begin{vmatrix} +(-\sin \phi \cos \theta - \cos \phi \sin \theta)R - \sin \phi \cdot x \\ (\cos \phi \cos \theta - \sin \phi \sin \theta)R + \cos \phi \cdot x \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$\frac{\partial \bar{r}_0}{\partial z} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix}; \quad \frac{\partial \bar{r}_0}{\partial x} = \begin{vmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Здійснимо перевірку на компланарність:

$$\frac{\partial \bar{r}_0}{\partial z} \cdot \frac{\partial \bar{r}_0}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \bar{r}_0}{\partial x} = 0$$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ (-\cos \phi \sin \theta - \sin \phi \cos \theta)R & (-\sin \phi \sin \theta + \cos \phi \cos \theta)R & 0 \end{vmatrix} = R \cos \theta$$

$R \cos \theta = 0$, при $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$; при $R = 0$.

$$\begin{vmatrix} (-\sin \phi \cos \theta - \cos \phi \sin \theta)R - \sin \phi \cdot x & (-\sin \phi \sin \theta + \cos \phi \cos \theta)R + \cos \phi \cdot x & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ (-\cos \phi \sin \theta - \sin \phi \cos \theta)R & (-\sin \phi \sin \theta + \cos \phi \cos \theta)R & 0 \end{vmatrix}$$

$$= R \sin \theta \cdot x$$

$R \sin \theta \cdot x = 0$, при $\theta = 0, \pi, 2\pi$; при $R = 0$; при $x = 0$.

Отже незалежними параметрами будуть ϕ і z . Приймаємо $\theta = 0$, тоді

$$\bar{r}_0 = \begin{vmatrix} (R+x) \cos \phi \\ (R+x) \sin \phi \\ z \\ 1 \end{vmatrix} - \text{рівняння циліндра.}$$

Радіус-вектор будь-якої точки для поверхні $\bar{r}_0 = r_0(u, v)$ визначається двома незалежними змінними u і v .

Нехай $u = \phi$, $v = z$

$$\frac{\partial \bar{r}_0}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \bar{r}_0}{\partial z} = \bar{c}.$$

$$\bar{c} = k \cdot \bar{n} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ -(x+R) \sin \phi & (x+R) \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$\bar{c} = \bar{i}c_1 + \bar{j}c_2 + \bar{k}c_3;$$

$$c_1 = \begin{vmatrix} (R+x) \cos \phi & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} = (x+R) \cos \phi - 0 = (x+R) \cos \phi;$$

$$c_2 = \begin{vmatrix} 0 & -(R+x) \sin \phi \\ 1 & 0 \end{vmatrix} = 0 - (-(x+R) \sin \phi) = (x+R) \sin \phi$$

$$c_3 = \begin{vmatrix} -(R+x) \sin \phi & (R+x) \cos \phi \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = 0$$

$$\text{Отже, } \bar{c} = \frac{\partial \bar{r}_0}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \bar{r}_0}{\partial z} = \begin{vmatrix} (R+x) \cos \phi \\ (R+x) \sin \phi \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Скалярний добуток

$|\bar{c}|$ - довжина вектора c

$$|\bar{c}| = \sqrt{(x+R)^2 \cos^2 \phi + (x+R)^2 \sin^2 \phi} = x+R.$$

$$\text{Отже, } \bar{n} = \frac{1}{x+R} \begin{vmatrix} (R+x) \cos \phi \\ (R+x) \sin \phi \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

Тоді рівняння векторного балансу точності матиме вигляд:

$$\Delta \bar{r}_0 = \sum_{i=1}^l A_{0,i} \cdot \varepsilon_i \cdot A_{i,l} \cdot e^{-4} \quad (3.8)$$

де ε_i - матриця похибки положення i -го вузла

В загальному випадку (для системи що має 6 степеней вільності) при відсутності деформацій матриця похибки положення набуває вигляду:

$$\varepsilon_i = \begin{vmatrix} 0 & -\gamma_i & \beta_i & \delta x_i \\ \gamma_i & 0 & -\alpha_i & \delta y_i \\ -\beta_i & \alpha_i & 0 & \delta z_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

де $\delta = \begin{vmatrix} \delta x_i \\ \delta y_i \\ \delta z_i \\ 0 \end{vmatrix}$ - похибка положення початку системи координат S відносно

початку координат S' відповідно.

α, β, γ - малі кути повороту системи S відносно осей x', y', z' системи S' відповідно.

Для нашого випадку з врахуванням $\theta = 0$ отримаємо:

$$\Delta \bar{r}_0 = \sum_{i=1}^5 A_{0,i} \cdot \varepsilon_i \cdot A_{i,5} \cdot e^{-4} = \varepsilon_0 A^6 A^1 A^3 A^6 A^1 e^{-4} + A^6 \varepsilon_1 A^1 A^3 A^6 A^1 e^{-4} + \\ + A^6 A^1 \varepsilon_2 A^3 A^6 A^1 e^{-4} + A^6 A^1 A^3 \varepsilon_3 A^6 A^1 e^{-4} + A^6 A^1 A^3 A^6 \varepsilon_4 A^1 e^{-4}$$

Підставимо в даний вираз рівняння які виражають формоутворюючий код верстату. Оскільки приведений аналітичний вираз є досить великим та складним, то відразу запишемо кінцеве рівняння, яке складається з п'яти складових.

$$\Delta \bar{r}_0 = \begin{vmatrix} -\gamma_0 \sin \phi \cdot R + \beta_0 z - \gamma_0 \sin \phi \cdot x + \delta x_0 \\ \gamma_0 \cos \phi \cdot R - \alpha_0 z + \gamma_0 \cos \phi \cdot x + \delta y_0 \\ (-\beta_0 \cos \phi + \alpha_0 \sin \phi)R + (-\beta_0 \cos \phi + \alpha_0 \sin \phi)x + \delta x_0 \\ 0 \end{vmatrix} +$$

$$\begin{vmatrix} -\sin \phi \cdot \gamma_1 R + (\cos \phi \cdot \beta_1 + \sin \phi \cdot \alpha_1)z - \sin \phi \cdot \gamma_1 x + \cos \phi \cdot \delta x_1 - \sin \phi \cdot \delta y_1 \\ \cos \phi \cdot \gamma_1 R + (\sin \phi \cdot \beta_1 - \cos \phi \cdot \alpha_1)z + \cos \phi \cdot \gamma_1 x + \sin \phi \cdot \delta x_1 + \cos \phi \cdot \delta y_1 \\ -\beta_1 R - \beta_1 x + \delta x_1 \\ 0 \end{vmatrix} +$$

$$+ \begin{vmatrix} -\sin \phi \cdot \gamma_2 R + (\cos \phi \cdot \beta_2 + \sin \phi \cdot \alpha_2)z + \cos \phi \cdot \delta x_2 - \sin \phi \cdot \delta y_2 \\ \cos \phi \cdot \gamma_2 R + (\sin \phi \cdot \beta_2 - \cos \phi \cdot \alpha_2)z + \sin \phi \cdot \delta x_2 + \cos \phi \cdot \delta y_2 \\ -\beta_2 R + \delta x_2 \\ 0 \end{vmatrix} +$$

$$+ \begin{vmatrix} -\sin \phi \cdot \gamma_3 R + \cos \phi \cdot \delta x_3 - \sin \phi \cdot \delta y_3 \\ \cos \phi \cdot \gamma_3 R + \sin \phi \cdot \delta x_3 + \cos \phi \cdot \delta y_3 \\ -\beta_3 R + \delta x_3 \\ 0 \end{vmatrix} +$$

$$\begin{vmatrix} -\sin \phi \cdot \gamma_4 R + \cos \phi \cdot \delta x_4 - \sin \phi \cdot \delta y_4 \\ \cos \phi \cdot \gamma_4 R + \sin \phi \cdot \delta x_4 + \cos \phi \cdot \delta y_4 \\ -\beta_4 R + \delta x_4 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

З метою спрощення запису приймаємо:

$$\Delta_1 = R \cdot \sum_{i=0}^4 \gamma_i + x \cdot \sum_{i=0}^1 \gamma_i + \sum_{i=1}^4 \delta y_i + (\alpha_1 + \alpha_2)z$$

$$\Delta_2 = \sum_{i=1}^4 \delta x_i + z(\beta_1 + \beta_2) \quad \Delta_3 = z\beta_0 + \delta x_0 \quad \Delta_4 = -z\alpha_0 + \delta y_0$$

$$\Delta_5 = (-\beta_0 \cos \phi + \alpha_0 \sin \phi)R + (-\beta_0 \cos \phi + \alpha_0 \sin \phi)x$$

$$+ \sum_{i=0}^4 \delta z_i - R \cdot \sum_{i=1}^4 \beta_i - x \cdot \sum_{i=1}^4 \beta_i$$

З врахуванням цього отримаємо

$$\Delta r_0 = \begin{vmatrix} -\Delta_1 \sin \phi + \Delta_2 \cos \phi + \Delta_3 \\ \Delta_1 \cos \phi + \Delta_2 \sin \phi + \Delta_4 \\ \Delta_5 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

Тоді рівняння проекції векторного балансу на нормаль поверхні буде мати вигляд:

$$\Delta \bar{r}_r = \Delta \bar{r}_0 \cdot n \quad (3.9)$$

де \bar{n} - одиничний вектор (орт) нормалі;

$\Delta \bar{r}_r$ - нормальна похибка.

$$\begin{aligned}\Delta \bar{r}_r &= (-\Delta_1 \sin \phi + \Delta_2 \cos \phi + \Delta_3) \cos \phi + (\Delta_1 \cos \phi + \Delta_2 \sin \phi + \Delta_4) \sin \phi = \\ &= \Delta_2 + \Delta_3 \cos \phi + \Delta_4 \sin \phi\end{aligned}$$

3.4.3. Рівняння середньоквадратичної базової циліндричної поверхні

При моделюванні точності обробки на шліфувальному верстаті важливо знати розміри та положення базової поверхні, які залежать як від відхилень точок обробленої поверхні від номінальної, так і від її виду.

Найбільш важливими видами базових поверхонь є:

- середньоквадратична базова поверхня (вона визначається по точках реальної поверхні таким чином, що середній квадрат відстані між точками реальної і базової поверхонь – мінімальний);
- прилягаюча базова поверхня (вона визначається по точках реальної обробки поверхні таким чином, що об'єм між базовою і реальною поверхнями, мінімальний, а всі точки реальної поверхні лежать по одну сторону від прилягаючої).

Тому для дослідження необхідно записати рівняння номінальної поверхні. задається рівнянням оброблюваної поверхні. В загальному випадку рівняння номінальної площини можна записати:

$$\bar{r}_0 = \bar{r}_0(u, v, \bar{q}_0) \quad (3.10)$$

а реальної обробленої площини:

$$\bar{r} = \bar{r}_0 + \Delta \bar{r}_0 = \bar{r}(u, v, \bar{q}_0), \quad (3.11)$$

де u, v - криволінійні координати поверхні,

\bar{q}_0 - вектор розмірних параметрів поверхні.

Для циліндричної поверхні це рівняння буде мати вигляд:

$$\bar{r}_0 = \bar{r}_0(u, v, \bar{q}_0) = \bar{r}_0(\phi, z, R, x) \quad (3.12)$$

тобто, незалежні криволінійні координати $u = \phi$ та $v = z$, а вектор розмірних параметрів \bar{q}_0 включає в себе R і x .

Оскільки базова поверхня від номінальної відхиляється на малу величину, то рівняння базової поверхні можна записати у вигляді:

$$\bar{r}_e = \bar{r}_0 + \Delta \bar{r}_e, \quad (3.13)$$

де $\Delta \bar{r}_\epsilon$ - сума векторів похибок положення і розмірів

$$\Delta \bar{r}_\epsilon = \epsilon_\epsilon \bar{r}_0 + d\bar{r}_\epsilon \quad (3.14)$$

ϵ_ϵ - матриця узагальненої похибки положення системи координат, яка визначається виразом:

$$\epsilon_\epsilon = \begin{vmatrix} 0 & -\gamma_\epsilon & \beta_\epsilon & \delta x_\epsilon \\ \gamma_\epsilon & 0 & -\alpha_\epsilon & \delta y_\epsilon \\ -\beta_\epsilon & \alpha_\epsilon & 0 & \delta z_\epsilon \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

де $\delta x_\epsilon, \delta y_\epsilon, \delta z_\epsilon$ - малі зміщення системи координат базової поверхні вздовж координатних осей x, y, z ;

$\alpha_\epsilon, \beta_\epsilon, \gamma_\epsilon$ - малі кути повороту базової поверхні відносно осей x, y, z .

Для нашого випадку, оскільки ϕ і z є незалежними змінними, то в матриці ϵ_ϵ похибки положення за даними координатами прирівнюються до 0, тобто $\gamma_\epsilon = \delta z_\epsilon = 0$

$$d\bar{r}_0 = \frac{\partial \bar{r}_0}{\partial R} \cdot \Delta R + \frac{\partial \bar{r}_0}{\partial x} \cdot \Delta x = \begin{vmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \cdot \Delta R + \begin{vmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \cdot \Delta x = \begin{vmatrix} \cos \phi (\Delta R + \Delta x) \\ \sin \phi (\Delta R + \Delta x) \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

де $d\bar{r}_0$ - повний диференціал \bar{r}_0 взятий по всіх складових вектору \bar{q}_0 змінних параметрів поверхні.

Маючи значення $d\bar{r}_0$ і ϵ_ϵ знайдемо значення $\Delta \bar{r}_\epsilon$:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{r}_\epsilon &= \epsilon_\epsilon \bar{r}_0 + d\bar{r}_\epsilon = \begin{vmatrix} 0 & -\gamma_\epsilon & \beta_\epsilon & \delta x_\epsilon \\ 0 & 0 & -\alpha_\epsilon & \delta y_\epsilon \\ -\beta_\epsilon & \alpha_\epsilon & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} (R+x) \cos \phi \\ (R+x) \sin \phi \\ z \\ 1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} (\Delta R + \Delta x) \cos \phi \\ (\Delta R + \Delta x) \sin \phi \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \\ &= \begin{vmatrix} \beta_\epsilon z + \delta x_\epsilon + (\Delta R + \Delta x) \cos \phi \\ -\alpha_\epsilon z + \delta y_\epsilon + (\Delta R + \Delta x) \sin \phi \\ -\beta_\epsilon (R+x) \cos \phi + \alpha_\epsilon (R+x) \sin \phi \\ 0 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

Таким чином $\Delta \bar{r}_\epsilon$ є функцією двох незалежних змінних ϕ і z і шести похибок: $\delta x_\epsilon, \delta y_\epsilon, \alpha_\epsilon, \beta_\epsilon, \Delta R, \Delta x$. Ці похибки є складовими вектору $\Delta \bar{q}$:

$$\Delta q = (\delta x_\epsilon, \delta y_\epsilon, \alpha_\epsilon, \beta_\epsilon, \Delta R, \Delta x)^T \quad (3.15)$$

Маючи вектор $\Delta \bar{r}_\epsilon$ і $\Delta \bar{q}$ можна знайти складові матриці G .

$$\Delta \bar{r}_\epsilon = G \cdot \Delta \bar{q}, \quad (3.16)$$

де складові матриці по стовпцях рівні $\frac{\partial \bar{r}_e}{\partial \Delta \bar{q}}$

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -z & (R+x) \sin \phi & 0 \\ z & 0 & -(R+x) \cos \phi & 0 \\ \sin \phi & \sin \phi & 0 & 0 \\ \cos \phi & \cos \phi & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} =$$

$(\cos \phi, \sin \phi, -z \sin \phi, z \cos \phi, l, 1)^T$.

Відповідно:

$$f_1 = \cos \phi; f_2 = \sin \phi; f_3 = -z \sin \phi; f_4 = z \cos \phi; f_5 = l; f_6 = 1;$$

Знайшовши ці коефіцієнти можна знайти складові матриці H

$$h_{ki} = \int_S f_k f_i ds$$

$$h_{11} = \int_S (f_1)^2 ds = \int_0^{2\pi} \int_0^L R \cos^2 \phi dz d\phi = \pi L$$

$$h_{12} = h_{21} = \int_S f_1 f_2 ds = \int_0^{2\pi} \int_0^L R \cos \phi \cdot \sin \phi dz d\phi = 0$$

$$h_{13} = h_{31} = \int_S f_1 f_3 ds = \int_0^{2\pi} \int_0^L R \cos \phi \cdot (-z \sin \phi) dz d\phi = 0$$

$$h_{14} = h_{41} = \int_0^{2\pi} \int_0^L R z \cos^2 \phi \cdot dz d\phi = \frac{1}{2} \pi L^2 R$$

$$h_{15} = h_{51} = \int_0^{2\pi} \int_0^L R \cos \phi \cdot dz d\phi = 0$$

$$h_{16} = h_{61} = \int_0^{2\pi} \int_0^L R \cos \phi \cdot dz d\phi = 0$$

$$h_{22} = \int_0^{2\pi} \int_0^L R \cdot \sin^2 \phi dz d\phi = \pi L R$$

$$h_{23} = h_{32} = \int_0^{2\pi} \int_0^L R (-z \sin^2 \phi) dz d\phi = -\frac{1}{2} \pi L^2 R$$

$$h_{24} = h_{42} = \int_0^{2\pi} \int_0^L R z \sin \phi \cos \phi dz d\phi = 0$$

$$h_{25} = h_{52} = \int_0^{2\pi} \int_0^L R \sin \phi dz d\phi = 0$$

$$h_{26} = h_{62} = \int_0^{2\pi} \int_0^L R \sin \phi \, dz d\phi = 0$$

$$h_{33} = \int_0^{2\pi} \int_0^L R z^2 \sin^2 \phi \, dz d\phi = \frac{1}{3} \pi L^3 R$$

$$h_{34} = h_{43} = \int_0^{2\pi} \int_0^L -R z^2 \sin \phi \cos \phi \, dz d\phi = 0$$

$$h_{35} = h_{53} = \int_0^{2\pi} \int_0^L -R z \sin \phi \, dz d\phi = 0$$

$$h_{36} = h_{63} = \int_0^{2\pi} \int_0^L -R z \sin \phi \, dz d\phi = 0$$

$$h_{44} = \int_0^{2\pi} \int_0^L R z^2 \cos^2 \phi \, dz d\phi = \frac{1}{3} \pi L^3 R$$

$$h_{45} = h_{54} = \int_0^{2\pi} \int_0^L R z \cos \phi \, dz d\phi = 0$$

$$h_{55} = \int_0^{2\pi} \int_0^L R \, dz d\phi = 2\pi L R$$

$$h_{66} = h_{56} = h_{66} = \int_0^{2\pi} \int_0^L R \, dz d\phi = 2\pi L R$$

$$H = \frac{1}{6} \pi R L \begin{vmatrix} 6 & 0 & 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 6 & -3L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3L & 2L^2 & 0 & 0 & 0 \\ 3L & 0 & 0 & 2L^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & 12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & 12 \end{vmatrix}$$

Приймаємо $\Delta x_s = \Delta x + \Delta R$ тоді отримаємо матрицю 5×5 .

Складові вектору параметрів \bar{d} визначимо за залежністю:

$$\bar{d}_i = \int_S f_i \Delta \bar{r}_n ds_i \Rightarrow \bar{d}_i = \int_0^{2\pi} \int_0^L R f_i \Delta \bar{r}_n \, dz d\phi$$

$$d_1 = \int_0^{2\pi} \int_0^L R \cos \phi (\delta x_1 + \delta x_2 + \delta x_3 + \delta x_4 + z\beta_1 + z\beta_2 + (z\beta_0 + \delta\alpha_0) \cos \phi + (-\alpha_0 z + \delta y_0) \sin \phi) \, dz d\phi = \frac{1}{2} \pi R L^2 \beta_0 + \pi R \delta x_0 L$$

$$d_2 = \int_0^{2\pi} \int_0^L R \sin \phi (\delta x_1 + \delta x_2 + \delta x_3 + \delta x_4 + z\beta_1 + z\beta_2 + (z\beta_0 + \delta\alpha_0) \cos \phi + (-\alpha_0 z + \delta y_0) \sin \phi) dz d\phi = -\frac{1}{2} \pi R L^2 \alpha_0 + \pi R \delta y_0 L$$

$$d_3 = \int_0^{2\pi} \int_0^L R (-z \sin \phi) (\delta x_1 + \delta x_2 + \delta x_3 + \delta x_4 + z\beta_1 + z\beta_2 + (z\beta_0 + \delta\alpha_0) \cos \phi + (-\alpha_0 z + \delta y_0) \sin \phi) dz d\phi = -\frac{1}{2} \pi R L^2 \delta y_0 + \frac{1}{3} \pi R L^3 \alpha_0$$

$$d_4 = \int_0^{2\pi} \int_0^L R z \cos \phi (\delta x_1 + \delta x_2 + \delta x_3 + \delta x_4 + z\beta_1 + z\beta_2 + (z\beta_0 + \delta\alpha_0) \cos \phi + (-\alpha_0 z + \delta y_0) \sin \phi) dz d\phi = -\frac{1}{3} \pi R L^3 \beta_0 + \frac{1}{2} \pi R L^2 \delta x_0$$

$$d_5 = d_6 = \int_0^{2\pi} \int_0^L R (\delta x_1 + \delta x_2 + \delta x_3 + \delta x_4 + z\beta_1 + z\beta_2 + (z\beta_0 + \delta\alpha_0) \cos \phi + (-\alpha_0 z + \delta y_0) \sin \phi) dz d\phi = 2R\delta x_1 L\pi + RL^2\beta_2\pi + 2R\delta x_2 L\pi + 2R\delta x_3 L\pi + 2R\delta x_4 L\pi + RL^2\beta_1$$

Отримані результати запишемо в матрицю: $\bar{d} = (d_1, d_2, d_3, d_4, d_5)^T$.

Отримані результати \bar{H} і \bar{d} підставляємо в рівняння $H \cdot \Delta \bar{q} = \bar{d}$ і розв'язок якого дає значення складових $\Delta \bar{q}$ від складових \bar{H} і \bar{d} .

Розв'язавши дану систему рівнянь отримаємо:

$$\delta x_\epsilon = \frac{2}{\pi RL} \left(2d_1 - \frac{3}{L} d_4 \right); \quad \delta y_\epsilon = \frac{2}{\pi RL} \left(3d_2 - \frac{3}{L} d_3 \right);$$

$$\alpha_\epsilon = \frac{6}{\pi RL^2} \left(\frac{2}{L} d_3 + d_2 \right); \quad \beta_\epsilon = \frac{6}{\pi RL^2} \left(\frac{2}{L} d_4 + d_1 \right); \quad \Delta x_s = \frac{d_5}{2\pi RL}.$$

Точність обертання заготовки залежить від двох похибок ϵ_0 і ϵ_1 :

ϵ_0 - похибка обертання шпинделя:

$$\delta x_\epsilon = 0; \quad \delta y_\epsilon = 0; \quad \beta_\epsilon = 0; \quad \alpha_\epsilon = 0; \quad \Delta x_s = \delta x_1 + \frac{1}{2} L \beta_1.$$

ϵ_1 - похибка положення осі заготовки:

$$\delta x_\epsilon = \delta x_0; \quad \delta y_\epsilon = -L\alpha_0 + 3\delta y_0; \quad \beta_\epsilon = 7\beta_0 + \frac{12}{L} \delta x_0; \quad \alpha_\epsilon = \alpha_0; \quad \Delta x_s = 0$$

3.5. Обговорення та аналіз отриманих результатів* (*опубліковані результати досліджень подані в додатках)

В процесі виконання кваліфікаційної роботи здійснено ґрунтовні інформаційно-патентні дослідження, результатом яких є опубліковані тези [42].

3.6. Висновки до розділу

В даному розділі здійснено представлення шліфувального верстату у вигляді складної ТС, яка складається з окремих підсистем, що пов'язані між собою енергетичними, інформаційними та матеріальними потоками. Здійснено аналіз кожної підсистеми шліфувального верстата з точки зору функцій, що виконують її складові елементи. На основі цього розроблено функціональні схеми підсистем за здійснено аналіз функцій, що виконують блоки та вузли верстата.

Для шліфувального верстату побудовано матрицю суміжності, яка дозволяє графічно відобразити зв'язки між блоками та вузлами верстату. На основі матриці суміжності побудовано зважений мультиграф структури шліфувального верстату. Це дозволяє здійснити аналіз значної кількості компоновок верстата та визначити які фактори впливають точність закріплення заготовки на шліфувальному верстаті.

В роботі з використанням методу морфологічного аналізу запропоновано морфологічну матрицю шліфувальних верстатів, яка дозволяє генерувати велику кількість компоновань верстатів.

На основі теоретичних положень методу парних порівнянь здійснено вибір оптимальної конструкції шліфувального верстату.

В роботі проведено моделювання точності обробки циліндричної поверхні на спеціальному шліфувальному верстаті. Розроблено математичну модель формоутворюючої системи шліфувального верстату. Для даної моделі складено векторний баланс точності в нормальному напрямку та визначено рівняння середньоквадратичної базової циліндричної поверхні. Визначені аналітичні залежності, що описують точність формоутворюючої системи верстата.

РОЗДІЛ 4.

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Пил як один з найшкідливіших факторів виробничого середовища

При механічній обробці матеріалів джерелами утворення та виділення шкідливих речовин в атмосферу є різні металорізальні та абразивні верстати, що працюють з охолодженням і без нього, окремі типи допоміжного устаткування. При роботі цього обладнання в повітря виділяються шкідливі речовини у вигляді пилу, аерозолів і туманів мастил та інших охолоджувальних рідин, різних газоподібних компонентів [3].

Виробничий пил - це завислі в повітрі тверді частинки речовини, тобто аерозоль, у якому дисперсною фазою є тверді частинки речовини, а дисперсним середовищем – повітря.

Під час механічної обробки деталей на металорізальних верстатах виділяється велика кількість металевого пилу, що має склад оброблюваного матеріалу (або оксидів оброблюваного матеріалу) В процесі обробки на токарних, фрезерних чи свердлильних верстатах переважно утворюється стружка, яку ми бачимо і відчуваємо, а при обробці на шліфувальних чи полірувальних верстатах утворюється дрібний абразивний пил, за складом аналогічний до матеріалу заточувального або шліфувального круга. Такий пил ми можемо і не бачити, він є найнебезпечнішим для здоров'я людини, оскільки осідає в легенях працівника і може викликати різноманітні професійні захворювання.

Дія пилу на організм людини залежить від його фізико-хімічних властивостей, тривалості впливу та концентрації. Дані про концентрацію пилу дають уяву про ступінь забруднення повітря і про ймовірність фіброгенної, подразнюючої і токсичної дії пилу на організм людини.

Виробничий пил залежно від його особливостей може бути причиною виникнення професійних пилових захворювань легень, поразки очей, шкіри або причиною гострих і хронічних отруень. При оцінці токсичної дії пилу необхідно враховувати такі фактори, як хімічний склад, полярність, розчинність, форма часток, дисперсність.

Діяння пилу на організм людини найбільше позначається на органи дихання, особливо якщо крупність частинок перевищує 10—15 мкм. При вдиханні такого пилу разом з повітрям частинки затримуються у верхніх дихальних шляхах і спричиняють їх подразнення та в деяких випадках навіть запалення. Пил може чинити вплив на органи зору, спричиняти запальні процеси (кон'юнктивіти), професійні катаракти, викликати сильну сенсibiliзуючу дію на слизову оболонку і роговицю ока.

Боротьба з виробничим пилом є надзвичайно важливою, тому на виробництві розробляють комплекс заходів по боротьбі з ним. До головних заходів по боротьбі з виробничим пилом відносять: це механізацію та автоматизацію робіт, виведення робітників із зони з підвищеною запиленістю повітря і зменшення фізичних зусиль. Боротьба за зниження рівня запиленості і профілактика захворювань має бути комплексною і включати заходи технологічного, санітарно-технічного, медико-біологічного і організаційного характеру.

До загальних заходів та засобів попередження забруднення повітряного середовища на виробництві та захисту працюючих належать [36]:

- вилучення шкідливих речовин у технологічних процесах, заміна шкідливих речовин менш шкідливими і т. ін.;
- удосконалення технологічних процесів та устаткування (застосування замкнутих технологічних циклів, неперервних технологічних процесів та ін.);
- автоматизація та дистанційне керування технологічними процесами;
- герметизація виробничого устаткування, робота технологічного устаткування під розрідженням, локалізація шкідливих виділень за рахунок місцевої вентиляції;

- нормальне функціонування систем опалення, загальнообмінної вентиляції, кондиціонування повітря, очищення викидів у атмосферу;
- попередні та періодичні медичні огляди робітників, які працюють у шкідливих умовах, профілактичне харчування, дотримання правил особистої гігієни;
- контроль за вмістом шкідливих речовин у повітрі робочої зони;
- використання засобів індивідуального захисту.

4.2. Конструкція пилевідсмоктувального приладу для видалення абразивного пилу із зони різання верстату, що проектується

В процесі шліфування, а також при обробці та заточуванні ріжучого інструмента без мастильно-охолоджувальної речовини (МОР) від поверхні дотику абразивного круга з деталлю виділяється велика кількість змішанного пилу (пилові частинки абразиву і матеріалу, що обробляється), а це становить небезпеку для людей [3].

При чорновому (грубому) шліфуванні кількість пилу, яка утворюється під час процесу різання абразивними інструментами, коливається в межах 100–300 г/год машинного часу, а при тонкому шліфуванні та заточуванні металевого інструмента – 25–50 г/год машинного часу. При цьому пил матеріалу, який обробляється, становить приблизно 80% загальної кількості пилу, який утворюється під час обробки абразивним інструментом.

В процесі роботи шліфувального круга утворюється два пилові потоки: основний – направлений по дотичній до кола абразивного круга, а інший потік передбачає рух дрібних пилових частинок в бік обертання круга. Форму та напрямок руху цих пилових потоків можна спостерігати по вогневих лініях, які утворюються при активній роботі абразивного круга.

Якщо обробку абразивним інструментом проводити без використання МОР, то потік пилових частинок має форму клина (біля місця його утворення) і спрямований в бік обертання абразивного круга. Кут клина і кут відхилення основного потоку від поверхні обробки залежать, в основному, від режимів

різання та меншою мірою від фізико-механічних властивостей матеріалу, що обробляється. Оскільки ці кути невеликі і коливаються в межах 2^0 - 5^0 у зв'язку з малими глибинами різання, тому дуже важко розмістити назустріч кругу вхідний отвір приймача пилю. Важливо, щоб пилоприймач був конструктивно пов'язаний з огороженням круга, а також в його конструкції слід передбачити надійний спосіб видалення частинок пилю.

В останні роки в практиці вітчизняних та закордонних фірм частіше зустрічаються пристрої для правки абразивного круга, що їх вмонтовано у комплексну систему: захисне огороження - пилоприймач.

Так для захисту від розриву абразивного круга кут відкривання огорожувального кожуха має бути мінімальним:

- 90° — для кругів обдирних і заточних верстатів;
- 150° — для кругів плоскошліфувальних верстатів.

В таких системах кожух конструктивно пов'язують з пилоприймачем, який під'єднується до індивідуальної або групової вентиляційної системи, що працює на всмоктування.

Ефективність системи вловлювання пилю та безпека при обробці різних матеріалів абразивними кругами суттєво залежать від конструкції кожуха пилоприймача, до якого застосовуються наступні вимоги:

- механічна гнучкість, яка запобігає пошкодженню кожуха у випадку розриву абразивного круга;
- максимальне (допустиме за умовами роботи) накриття кожухом абразивного круга, зменшуючи до мінімуму можливість вильоту гострих частинок круга у випадку його розриву;
- оптимальне розміщення пилоприймальної частини кожуха по відношенню до напрямку пилового потоку;
- використання нижньої частини кожуха пилоприймача в якості першого ступеня очистки повітря від пилю (для обдирних шліфувальних верстатів);
- вловлення та відвід пилових частинок при правці абразивного круга.

Пиловідсмоктувальні прилади, які розміщуються на верстаті повинні забезпечувати очистку повітря від полідисперсного пилю, у зв'язку з чим доцільно застосовувати прилади з дво - і тріступеневою системою очистки. При конструюванні таких приладів необхідно передбачати вихід очищеного повітря до приміщення з малими швидкостями і переважно доверху.

Для цього можна застосувати індивідуальний відсмоктувальний пристрій, який виконується у вигляді окремого агрегату, який конструктивно не пов'язаний з верстатом, але при цьому який має цілий ряд переваг:

- можливість застосування для різних типів верстатів, в тому числі шліфувальних;
- можливість перестановки з одного верстата на інший;
- можливість використовувати його пилотяг для прибирання приміщень після закінчення робочого дня;
- можливість вбудувати його у верстат;
- високий ступінь очищення.

Індивідуальний відсмоктувальний пристрій (рис. 4.1.) складається з пило-стружкоприймальника, через який пило-повітряна суміш надходить по гнучкому трубопроводу в відцентрово-інерційний пиловловлювач.

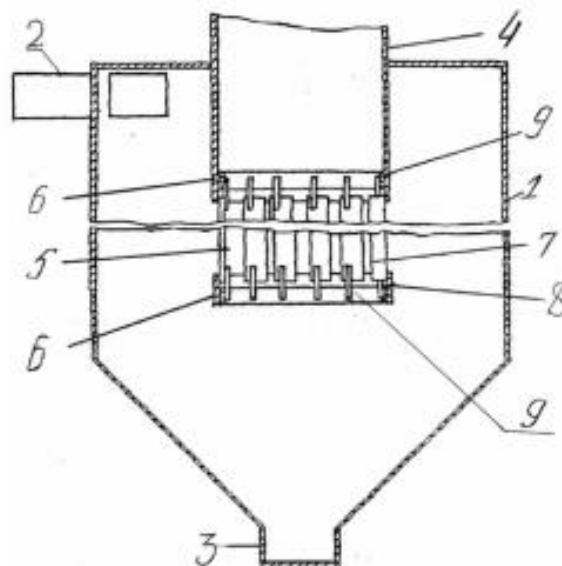


Рис. 4.1. Відцентрово-інерційний пиловловлювач

Пилоповітряна суміш, яка потрапила в апарат через тангенціальний вхідний патрубок 2, гвинтоподібно рухається зверху вниз. При цьому великі частинки пилю під дією відцентрових сил відкидаються до стінки корпусу 1,

здійснюючи таким чином первинне очищення повітря від пилу. Частинки дрібнодисперсного пилу, які не виділилися з потоку, захоплюються потоком, що рухається вздовж жалюзійного відокремлювача 5, вдаряються об жалюзі 7, відбиваються від них доти, поки не відкинуться до стінки корпусу 1, де рухається потік великодисперсного пилу. Кількість зіткнень залежить від фізико-хімічних, морфометричних і дисперсних якостей пилу. Таким чином відбувається вторинне очищення повітря від пилу: дрібнодисперсні частинки пилу відбиваються жалюзі 7 всередину апарата до його стінки, а очищене повітря виводиться назовні через патрубок 4.

4.3. Організація ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій

Для організації робіт щодо ліквідації наслідків аварій, катастроф та стихійних лих утворюються Державні комісії з надзвичайних ситуацій (ДКНС). Вони діють при Кабінеті міністрів країни, в областях, містах, регіонах як на постійній основі, так і у випадку виникнення надзвичайних ситуацій (НС). До їх функцій входить забезпечення постійної готовності до дій аварійно-рятувальних служб, контроль за розробкою та реалізацією заходів з попередження можливих аварій і катастроф.

При виникненні в регіоні НС відповідні служби повинні здійснити [24]:

- сповіщення населення про небезпеку чи загрозу безпеки;
- евакуацію людей та тварин із небезпечних зон, з використанням засобів профілактики захворювань, травматизму, надання медичної та іншої допомоги;
- локалізацію аварій, зупинку чи зміну технологічного процесу, заходи щодо попередження розповсюдження та гасіння пожеж;
- приведення в готовність органів управління, сил і засобів для рятувальних робіт, ведення розвідки в осередках ураження, оцінку ситуації, що склалася.

Рятувальні та інші невідкладні роботи починаються одразу ж у міру готовності сил та засобів для їх проведення, їх ведуть безперервно, при потребі здійснюють заміну рятувальників та ліквідаторів при дотриманні техніки безпеки та заходів перестороги.

Після цього вирішуються завдання щодо забезпечення життєдіяльності населення в районах, що постраждали внаслідок аварії, катастрофи чи стихійного лиха. Цей етап робіт передбачає відновлення зруйнованого житла, спорудження тимчасових будівель (намети, землянки, навіси тощо), відновлення енерго- та водозабезпечення, ліній зв'язку, об'єктів комунального обслуговування. За потреби здійснюються санітарне очищення осередку ураження, забезпечення людей продуктами харчування, предметами першої необхідності та ін.

Одночасно з цим розпочинаються роботи з відновлення функціонування уражених об'єктів. Багато видів НС можна прогнозувати (повені, пожежі), що дає можливість завчасно спланувати основні заходи з ліквідації їх наслідків. Проведення робіт за підготовленим планом (відкоригованим згідно з реальною ситуацією) дозволить значно прискорити ці роботи, зменшити масштаб наслідків аварії чи катастрофи.

Ліквідація наслідків НС ефективною, якщо керуватися наступними принципами:

- висока швидкість розгортання сил і засобів для проведення рятувальних робіт (в першу чергу слід використовувати місцеві сили та засоби, а вже далі використовувати по мірі потреби допомогу);
- роботи в осередку ураження (зараження) ведуться з використанням засобів механізації і лише за їх відсутності – вручну;
- добра забезпеченість використовуваних технічних засобів витратними матеріалами (вода, паливо, тощо);
- залучення кваліфікованого персоналу (виконання робіт не за спеціальністю допускається лише у надзвичайних випадках);
- строге дотримання заходів безпеки, особливо при діях в небезпечних зонах і на заражених ділянках;
- завершеність (всі рятувальні та невідкладні аварійно-відновлювальні роботи розгортаються на широкому фронті і проводяться до повного завершення).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Поява нових інструментальних матеріалів та вдосконалення існуючих способів абразивного шліфування підвищує якість та точність обробки деталей. Але на точність виготовленої деталі також має вплив власна точність верстату. Їх точність закладається ще на етапі проектування шліфувального верстату.

При проектуванні конструкції шліфувального верстату доцільно використовувати системний підхід та основні положення багатоцільового підходу до створення об'єктів нової техніки та технології.

В роботі здійснено ґрунтовні інформаційно-патентні дослідження об'єктом якого були існуючі конструкції шліфувальних верстатів та способи торцевого шліфування.

В кваліфікаційній роботі магістра здійснено основний технологічний розрахунок стосовно базової деталі, якою є «Шестерня МБК34М4568». Даний розрахунок передбачав розробку маршрутного ТП виготовлення деталі, розрахунок режимів різання на лімітуючу (шліфувальну операцію). Були отримані всі необхідні для подальших розрахунків дані.

В роботі розроблено структурно-кінематичну та кінематичну схему верстата, для цього були використанні основні положення теорії формоутворюючих рухів та результати попереднього аналізу деталі. На верстаті буде здійснюватися обробка внутрішніх та зовнішніх циліндричних та торцевих поверхонь.

З використанням умов відбору запропонованих Ю.Д. Враговим здійснено вибір оптимальної компоновки шліфувального верстату. Для приведеної компонуваної схеми розроблено кінематичну схему для якої виконані кінематичні розрахунки.

Проведені розрахунки показали, що в якості приводу обрано двигун 4AP18OS4CY1, в якого $n = 1500$ об/хв, $N = 22,0$ кВт.

В роботі проведено розрахунок шпиндельного вузла, здійснено вибір його геометричних характеристик, а також проведено розрахунок гідродинамічних підшипників, які використовуються в якості опор.

Скориставшись програмою «Комплекс інженерних розрахунків» здійснено автоматизоване проектування клинопасової передачі, яка використовується в приводі бабки. Розрахунки проведені для трьох ступеней клинопасової передачі.

В третьому розділі кваліфікаційної роботи здійснено представлення шліфувального верстату як системи. Для цього в роботі приведено функціональні схеми усіх підсистем проектованого верстату (обробки, маніпулювання, керування та контролю, а також обслуговуючої системи).

Проведено аналіз основних функцій, що виконують складові блоки та окремі вузли верстату, встановлено які взаємозв'язки існують між ними. З використанням структурних матриць здійснено формалізований опис верстату. В результаті ми отримали матрицю 17 на 17 елементів. На основі даної матриці складено зважений мультиграф структури шліфувального верстату.

На основі методу морфологічного аналізу розроблено морфологічну матрицю шліфувальних верстатів, яка дозволяє синтезувати 15552 теоретично можливих варіанти верстатів.

З використанням методу парних порівнянь на основі вибраних вагових коефіцієнтів вибрано оптимальний варіант компоновання верстату.

Для обраного варіанту компоновання складено рівняння оброблюваної поверхні у формоутворюючому вигляді, а також записано матриці, що описують складові формоутворюючого коду шліфувального верстату. В роботі з використанням теорії векторного та матричного числення здійснено розрахунок векторного балансу точності в нормальному напрямку. Також виведено рівняння середньоквадратичної базової циліндричної поверхні. Це дозволило нам визначити складові похибки обертання шпинделя та похибки положення осі заготовки.

В кваліфікаційній роботі в четвертому розділі висвітлені питання, які стосуються охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. Визначено чому абразивний пил відносять до шкідливих факторів виробничого середовища та запропоновано конструкцію пилевідсмоктувального приладу, який дозволяє його видалити із зони різання верстату. Також в даному розділі розглянуто особливості організації ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении / Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов, А. Ф. Прохоров и др.- М.: Машиностроение, 1986.- 256с.
2. Авторское свидетельство 1602043 SU, МПК В24В5/12 / Шлифовальный станок с ЧПУ для наружного и внутреннего шлифования / Лейках Л. М., Капель А. П., Клигер М. А., Гельфельд О. М., Щербаков В. П.; заявитель Московское специальное конструкторское бюро автоматических линий и специальных станков. - № а. 4109977/08; заявл. 13.08.1986; опубл. 50.05.1991. Бюл. № 20.
3. Батлук В. А. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ [Електронний ресурс] / В. А. Батлук, В. К. Батлук, Н. В. Ступницька. – 2004. – Режим доступу до ресурсу: <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/8680/1/01.pdf>.
4. Боженко Л. І. Технологія машинобудування. Проектування та виробництво заготовок. – Львів: Світ, 1996.
5. Бушуев В. В. Основы конструирования станков. - М.: СТАНКИН, 1990.- 520с.
6. Васильев Г. Н. Автоматизация проектирования металлорежущих станков.– М.: Машиностроение. 1987.- 280с.
7. Василюк Г.Д., Лоев В.Ю., Мельничук П.П. Конструювання, розрахунок та експлуатація токарних верстатів з ЧПК. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 268 с.
8. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков.- М.: Машиностроение, 1978.- 208 с.
9. Директор С., Рорер Р. Введение в теорию систем. М.: Мир, 1974.- 326с.
10. Кальченко В. И., Кальченко В. В., Венжега В. И. Торцевое шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали (Монография).– Чернигов: ЧГТУ, 2013. – 185с.; ил.
11. Каминская В.В., Кушнир Э.Ф. Автоматизированный расчет несущих систем металлорежущих станков. - М.: ЭНИМС, 1990. - 58с.

12. Кобельник В. Р., Крупа В. В., Каровська О. В., Тимошенко Н. М. Використання методу ітерацій для дослідження точності подач металорізальних верстатів // *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї - наука - виробництво : матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції, Краматорськ, 2018. – 2018. – С. 78–80.*

13. Кочергин А. И. Конструирование и расчет металлорежущих станков и станочных комплексов. Курсовое проектирование: Учеб. пособие для вузов.- Мн.: Выш. шк., 1991.- 382 с.

14. Крижанівський В. А., Кузнецов Ю. М., Валявський І. А., Скляр Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою. – Кіровоград, 2004. – 449с.

15. Кузнецов Ю. Н. Станки с ЧПУ: Учебное пособие.- К.: Вища школа, 1991.- 278 с.

16. Кузнецов Ю.М. Теорія технічних систем / Ю. М. Кузнецов, І. В. Луців, С. А. Дубиняк. – К. – Тернопіль, 1997. – 310с.

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

18. Кушнир Э. Ф., Портман В. Т. Структурный синтез расчетных моделей механики станков // *Станки и инструмент. - 1991. - № 9, 10.*

19. Левин А. И. Методические основы автоматизации проектирования металлорежущих станков. – Проблемы машиностроения и автоматизации/ Международный центр научной и технической информации, Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Академии наук СССР, Информационный центр промышленности, Информэлектро – головной орган ИНФОРМАШ, Москва – Будапешт, 1988, №21, 34-42с.

20. Левин А.И. Математическое моделирование в исследовании и проектировании станков. - М.: Машиностроение, 1978. - 184 с.

21. Луців І. В., Інтелектуальна власність. (частина 1). Система охорони інтелектуальної власності: навчальний посібник / Луців І. В., Скляр Р. А., Шанайда В. В. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2015. – 112 с.

22. Металлорежущие станки: Учебник для машиностроительных вузов / Под ред. В. Э. Пуша.- М.: Машиностроение, 1986.- 576 с.
23. Обработка металлов резанием. Справочник технолога. Под редакцией Папанова А. А. М. : Машиностроение, 1988, - 736 с.
24. Огринський П.І., Єнкало В. М., Дембіцький С. І. Безпека життєдіяльності. Навчальний посібник. Львів., 1997. -275 с.
25. Основы моделирования сложных систем. / Под общ. ред. д-ра техн. наук И. В. Кузьмина.- К.: Вища школа, 1981.- 360с
26. Основы формообразования поверхностей резаньем. Родин П. Р.- Киев: Вища школа, 1977.- 192 с.
27. Паливода Ю.Є., Дячун А.Є., Лещук Р.Я. Інструментальні матеріали, режими різання і технічне нормування механічної обробки: навчальний посібник. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. 240 с.
28. Патент 28792 UA, МПК В24В5/00 / ШЛІФУВАЛЬНИЙ ВЕРСТАТ / Пестунов В. М.; заявник КІРОВОГРАДСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ.- № а 97094727; заявл. 23.09.1997; опубл. 16.10.2000. Бюл. № 5, 2000 р.
29. Патент 28792 UA, МПК В24В5/00 / ШЛІФУВАЛЬНИЙ ВЕРСТАТ / Пестунов В. М.; заявник КІРОВОГРАДСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ.- № а 97094727; заявл. 23.09.1997; опубл. 16.10.2000. Бюл. № 5, 2000 р.
30. Патент 2909 UA, МПК В24В5/00 / ШЛІФУВАЛЬНИЙ ВЕРСТАТ / Крижанівський В. А.; заявник КІРОВОГРАДСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ.- № а 2003076223; заявл. 04.07.2003; опубл. 15.09.2004. Бюл. № 9, 2004 р.
31. Патент 3803 UA, МПК В24В5/00 / Универсальный круглошлифовальный станок / Дятел Н. Н., Захарченко В. И., Пинчук Н. Д., Снисаренко И. Н., Сухопара А. Е.; опубл. 27.12.1994. Бюл. № 12, 1994 р.
32. Патент 40015 UA, МПК В24В5/04 / Спосіб шліфування циліндричних і торцевих поверхонь / Кальченко В. І., Кальченко В. В.; заявник Чернігівський

технологічний інститут.- № а 97126462; заявл. 30.12.1997; опубл. 16.07.2001, Бюл. № 6, 2001 р.

33. Патент 40016А UA, МПК В24В5/04 / Спосіб шліфування торців циліндричних деталей / Кальченко В. В.; заявник Чернігівський технологічний інститут.- № 97126463; заявл. 30.12.1997; опубл. 16.07.2001, Бюл. № 6, 2001 р.

34. Патент 6033 UA, МПК В24В5/00 / ШЛІФУВАЛЬНИЙ ВЕРСТАТ / Крижанівський В. А. Пестунов В. М., Русавський С. А.; заявник КІРОВОГРАДСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ.- № а 20040705688; заявл. 12.07.2004; опубл. 15.04.2005. Бюл. № 4, 2005 р.

35. Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П. Введение в системный анализ: Учебное пособие для вузов.- М.: Высш. шк., 1989.- 367с.

36. Повітря робочої зони [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.ztec.com.ua/ztec/e-lib/Охорона%20праці/Тема%208%20Повітря%20робочої%20зони.pdf>

37. Портман В. Т. Определение функциональных характеристик станков на основе анализа процесса формообразования // Станки и инструмент, 1981.- №10.- с.1-3.

38. Портман В. Т. Синтез компоновок станков на основе анализа процесса формообразования // Станки и инструмент, 1982.- №7.- с.8-11.

39. Проников А. С. Надежность машин. - М.: Машиностроение, 1978. - 592 с.

40. Синтез технологічного оснащення для абразивної обробки деталей різних конфігурацій / І. В. Луців, Р. Я. Лещук, В. Р. Кобельник, Г. С. Нагорняк // Матеріали міжнародної наукової конференції «Іван Пулюй: життя в ім'я науки та України» (до 175-ліття від дня народження), 28-30 вересня 2020 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2020. — С. 87–88. — (Важливі аспекти практичного застосування здобутків сучасної науки і новітніх технологій).

41. Системи автоматизованого проектування верстатів. Навчальний посібник./ О. Ф. Гордєєв, П. О. Захаров.- Луцьк: ЛП, 1997.- 123 с.

42. Склярів Р. А., Приходай Д. А., Шляхи підвищення точності обробки на металорізальних верстатах // Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей X міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль,

24–25 листоп. 2021.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2021. Т. 1. – 155. — С. 56.

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

44. Соболев А. Н. Автоматизация синтеза технических решений: учебное пособие.- Йошкар-Ола: МарГУ, 1983.- 123с.

45. Сорокин В. Г., Волосников А. В. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1989.

46. Справочник технолога машиностроителя: В 2-х т. Т.2. Изд. 3 переработанное / под ред. А. Н. Малова. М., “Машиностроение”, 1972. с. 568.

47. Справочник технолога машиностроителя: В 2-х т. Т.2. Изд. 3 переработанное Под ред. А. Н. Малова. М., “Машиностроение”, 1972. с. 568.

48. Хомяков В.С., Давыдов И.И. Автоматизированное проектирование компоновок металлорежущих станков // Станки и инструмент, 1990.- №5.- с.4-7.

49. Шанайда В. В. Пакет MathCAD в інженерних розрахунках / Шанайда В. В. – Тернопіль: Видавництво ТДТУ, 2001. – 163 с.

50. Vitenko T. Features of creating a solid models and assembly operations at CAD-systems / Vitenko T., Shanaida V., Drożdziel P., Madlenak R. // 9th International Conference on Education and New Learning Technologies, Barcelona (Spain), 3rd-5th of July, 2017: IATED Academy, 2017. – P. 7464-7469. – Режим доступу: <https://library.iated.org/view/VITENKO2017FEA>

ДОДАТКИ