Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри ММіР
к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
«____» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

«Дослідження верстатної системи для алмазного хонінгування отворів»

Виконав здобувач вищої освіти ІІ-го курсу
групи ГМ-24М-3
ОНП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування »
_____ Дмитро КАЛЬМУКОВ

Керівник роботи к.т.н., доцент
_____ Кирил ЩЕРБИНА

Рецензент:
_____ _____

Кропивницький – 2026

Центральноукраїнський національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Механіко-технологічний факультет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніка і робототехніка»
Освітнього ступеня магістр
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

_____
"____" _____20___року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кальмуков Дмитро Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження верстатної системи для алмазного хонінгування отворів
керівник роботи: Щербина Кирил Костянтинович, доцент канд. техн наук ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу №_____ від "_" ____20__року
2. Строк подання студентом проекту _____
3. Вихідні дані до роботи _____
3.1. Креслення деталей
3.2. Аналіз існуючих хонінгувальних верстатів
3.3. Аналіз конструкції існуючих інструментів для алмазно-абразивної обробки отворів
3.4. Аналіз існуючих способів утворення траєкторії руху зерна в процесі алмазно-абразивної обробки отворів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
4.1 Аналіз традиційних верстатних систем для хонінгування отворів
4.2 Теоретична частина
4.3 Дослідна частина
4.4 Конструкторська частина
4.5 Економічне обгрунтування доцільності розробки хонінгувальної головки
4.6 Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Графічний матеріал - 12 л. ф.А4

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічна частина	к.е.н., доц. Журило І.В.		

7. Дата видачі завдання_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз традиційних верстатних систем для хонінгування отворів	21.03.2026	
2	Теоретична частина	31.03.2026	
3	Конструкторська частина	14.04.2026	
4	Дослідна частина	24.04.2026	
5	Економічне обґрунтування доцільності розробки хонінгувальної головки	29.04.2026	
6	Розробка презентації	05.05.2026	

Студент _____ Кальмуков Д.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту _____ Щербина К.К.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Анотація

Кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки на 83 сторінках та графічної частини на 12 листах формату А4.

1. Актуальність роботи. Сучасний стан науково-технічних розробок у галузі фінішно-одобрювальної обробки свідчить про відсутність вичерпного теоретичного обґрунтування та комплексних експериментальних даних щодо динаміки формування радіального розміру в процесі хонінгування. Бракує цілісних аналітичних моделей, які б адекватно описували механізм керування розмірною точністю з урахуванням стохастичного характеру взаємодії абразивного інструменту з поверхнею отвору

2. Наукова новизна роботи. Сформовано теоретичні засади побудови системи адаптивного керування процесом алмазно-абразивного хонінгування в єдиному функціональному середовищі. Науково обґрунтовано переваги переходу від стратегій активного контролю розмірів до адаптивного регулювання за силовими параметрами різання. Доведено, що для процесів зі складною кінематикою стабілізація динамічних характеристик обробки забезпечує вищу точність формування розміру шляхом компенсації пружних деформацій технологічної системи

3. Практична цінність роботи. Спроектовано та реалізовано конструкцію прецизійного механотронного хонінгувального модуля з ЧПК, інтегрованого в продукційне середовище для фінішної обробки складних поверхонь деталей типу „Картер” (кресл. УЯИШ 731158.009) та „Гвинт” (кресл. УЯИШ 716652.002). Технічні рішення, закладені в архітектуру верстата, дозволяють реалізувати алгоритми адаптивного керування для забезпечення заданих параметрів макрогеометрії та шорсткості в автоматизованому циклі

4. Оцінка найбільш важливої суті роботи виконаної роботи.

Виконано системний аналіз конструктивних схем традиційних хонінгувальних головок, за результатами якого ідентифіковано негативний вплив статичного та кінематичного тертя на динамічну стабільність процесу. Шляхом

структурно-функціонального синтезу розроблено теоретичну модель верстатної системи, що реалізує алгоритми адаптивного керування циклом обробки.

Експериментальна апробація запропонованих рішень при хонінгуванні прецизійних поверхонь деталей „Картер” (УЯИШ 731158.009) та „Гвинт” (УЯИШ 716652.002) підтвердила адекватність розроблених теоретичних залежностей та високу збіжність розрахункових і емпіричних даних.

На основі комплексного підходу обґрунтовано параметри організації виробництва, заходи з техногенної безпеки та охорони праці. Розрахунок показників економічної ефективності довів доцільність впровадження розробленої технології у серійне виробництво

Ключові слова: хонінгувальна головка, верстати, прецензійний отвір, якість, точність.

Annotation

The qualification work consists of an explanatory note on 83 pages and a graphic part on 12 A4 sheets.

1. **Relevance of the work**. The current state of research and development in the field of finishing and decorative processing indicates a lack of comprehensive theoretical substantiation and exhaustive experimental data regarding the dynamics of radial size formation during the honing process. There is a deficiency of integrated analytical models capable of adequately describing the mechanism of dimensional accuracy control, taking into account the stochastic nature of the interaction between the abrasive tool and the bore surface

2. **Scientific novelty of the work**. Theoretical foundations have been established for constructing an adaptive control system for the diamond-abrasive honing process within a unified functional environment. The advantages of transitioning from active size control strategies to adaptive regulation based on cutting force parameters have been scientifically substantiated. It has been proven that for processes with complex kinematics, the stabilization of dynamic machining characteristics ensures higher precision in size formation by compensating for the elastic deformations of the technological system.

3. Practical value of the work. The design of a precision mechatronic CNC honing module has been developed and implemented, integrated into a production environment for the finishing of complex surfaces of parts such as 'Crankcase' (УЯИШ 731158.009) and 'Screw' (УЯИШ 716652.002). The technical solutions embedded in the machine's architecture allow for the implementation of adaptive control algorithms to ensure specified macrogeometry and roughness parameters within an automated cycle..

4. Evaluation of the most important essence of the work performed. A systems analysis of the structural designs of traditional honing heads has been performed, the results of which identified the negative impact of static and kinematic friction on the dynamic stability of the process. Through structural-functional synthesis, a theoretical

model of the machine system was developed, implementing adaptive control algorithms for the machining cycle.

Experimental testing of the proposed solutions during the honing of precision surfaces of the 'Crankcase' (УЯИШ 731158.009) and 'Screw' (УЯИШ 716652.002) parts confirmed the adequacy of the developed theoretical relationships and the high convergence of calculated and empirical data.

Based on an integrated approach, the parameters of production organization, measures for industrial safety, and labor protection have been substantiated. The calculation of economic efficiency indicators proved the feasibility of implementing the developed technology into mass production.

Key words: honing head, machine tools, precision bore, quality, accuracy.

ЗМІСТ

ВСТУП 10

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТРАДИЦІЙНИХ ВЕРСТАТНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ХОНІНГУВАННЯ ОТВОРІВ 11

1.1. Аналіз та синтез існуючих верстатів для відділкової алмазної або абразивної обробки отворів 11

1.2. Аналіз і синтез верстата 3Г833. 12

1.3. Аналіз і синтез верстатів 3М83 та 3Н85 13

1.4. Аналіз і синтез верстата з круговою та осьовою осциляцією 14

1.5. Аналіз і синтез хонінгувально-доводочного верстата 15

1.6. Аналіз і синтез хонінгувального верстата 18

1.7 Висновки 20

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА 21

2.1. Продукційний хонінгувальний верстат 21

2.2. Аналіз утворення траєкторії руху зерна інструменту на продукційному верстаті з СРРР з адаптивним програмним керуванням 30

2.5 Висновки і рекомендації 39

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА 40

3.1. Загальні вимоги до проведення експериментальних досліджень. 40

3.2. Експериментальне дослідження процесу хонінгування. 42

3.2.1 Дослідження схрещування траєкторії слідів алмазно-абразивних брусків. 42

3.2.2 Дослідження радіального зносу алмазно-абразивного бруска в залежності від радіальної та осьової швидкості в умовах багатофакторного експерименту. 44

3.2.3 Дослідження шорсткості поверхні при варіюванні в залежності від швидкості різання в умовах багатофакторного експерименту. 50

3.2.4 Дослідження впливу часу обробки на шорсткість поверхні та знос радіального бруска. 55

Висновки 58

РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РОЗРОБКИ ХОНІНГУВАЛЬНОЇ ГОЛОВКИ 59
5.1. Загальні вихідні дані 59
5.2. Визначення витрат на підготовку виробництва 61
5.3. Визначення витрат на виготовлення хонінгувальної головки та модернізації верстата 65
5.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки) 68
5.5. Розрахунок показників економічної ефективності проекту 73
ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ 76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 78

ВСТУП

Фінішна алмазно-абразивна обробка прецизійних отворів деталей машин становить складну науково-технічну задачу, зумовлену жорсткими вимогами до забезпечення геометричної точності, параметрів мікрорельєфу поверхонь та суворих розмірних допусків. Попри існуюче розмаїття методів та інструментальних систем, що дозволяють досягати заданих експлуатаційних показників, особливої актуальності набуває вдосконалення технології алмазного хонінгування.

Даний метод демонструє високу технологічну ефективність, зокрема при обробці переривчастих поверхонь із внутрішніми поздовжніми канавками, де традиційне шліфування часто супроводжується ударними навантаженнями та порушенням цілісності кромки. Проте відомі схеми реалізації алмазного хонінгування мають суттєві обмеження щодо повної автоматизації та впровадження систем адаптивного керування в реальному часі. Це обумовлено нестабільністю сил різання та змінною жорсткістю технологічної системи, що не дозволяє традиційним методам активного контролю оперативно реагувати на відхилення параметрів процесу. У зв’язку з цим виникає необхідність розробки інтелектуалізованої системи управління, яка б використовувала поточні показники режимів обробки та силові характеристики як вхідні параметри для формування зворотного зв’язку.

Такий підхід дозволить здійснювати динамічну корекцію радіальної подачі та швидкості осциляції, забезпечуючи стабілізацію та інтенсифікацію знімання припуску при збереженні високої якості обробленої поверхні. Відповідно, метою даної магістерської роботи є наукове обґрунтування, розробка та експериментальне дослідження процесу алмазного хонінгування в умовах адаптивного керування, що дозволить підвищити точність формування радіальних розмірів та загальну продуктивність виготовлення деталей типу «Картер» та «Гвинт».

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ТРАДИЦІЙНИХ ВЕРСТАТНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ХОНІНГУВАННЯ ОТВОРІВ

1.1. Аналіз та синтез існуючих верстатів для відділкової алмазної або абразивної обробки отворів.

Фінішна алмазно-абразивна обробка отворів реалізується переважно на вертикально-хонінгувальних верстатах [2, 3, 6, 13], де кінематична схема більшості моделей передбачає поєднання головного обертального руху інструмента та зворотно-поступального руху подачі. З метою підвищення параметрів геометричної точності, інтенсифікації обробки важкооброблюваних матеріалів та зростання продуктивності, до загального циклу рухів інтегрують додаткову осциляцію (осьову або кругову) [2].

Важливим аспектом проектування таких верстатів є раціональне співвідношення між концентрацією та диференціацією рухів у технологічній системі. Під концентрацією рухів розуміють зосередження всіх кінематичних циклів обробки на одному з елементів системи (зазвичай на інструменті), тоді як диференціація передбачає розподіл функціональних рухів між обома взаємодіючими ланками — інструментом та заготовкою. Враховуючи, що надмірна концентрація рухів суттєво ускладнює конструкцію шпиндельного вузла, при розробці сучасного обладнання доцільно прагнути до оптимальної диференціації кінематики.

Для системного аналізу та класифікації існуючого парку хонінгувального обладнання сформульовано наступний перелік техніко-технологічних вимог:

Динамічні характеристики привода: забезпечення високої жорсткості, точності позиціонування та швидкодії механізмів зворотно-поступального руху.

Ступінь диференціації: раціональний розподіл виконавчих рухів між вузлами верстата для спрощення конструкції та підвищення вібростійкості.

Функціональна надлишковість: наявність механізмів для реалізації осцилюючих рухів (осьових та тангенціальних).

Інтелектуалізація керування: можливість інтеграції адаптивних систем керування (САК) для корекції параметрів процесу в реальному часі.

На основі зазначених критеріїв проведено порівняльний аналіз сучасних конструкцій хонінгувальних верстатів.

1.2. Аналіз і синтез верстата 3Г833.

Для системного аналізу кінематичної структури хонінгувального верстата моделі 3Г833 розроблено структурну схему (рис. 1.2.1) за методологією, викладеною у праці [27].

Згідно з представленою архітектурою, головний рух різання (обертання шпинделя з інструментом) реалізується через електромеханічний ланцюг, що складається з асинхронного електродвигуна та механічної трансмісії. Виконавчий рух подачі має зворотно-поступальний характер і передається безпосередньо шпиндельному вузлу. У даній моделі цей рух також забезпечується електромеханічним приводом (на відміну від гідравлічних аналогів), що визначає жорсткість кінематичного зв'язку та стабільність швидкості переміщення.

Варто зазначити, що конструктивне виконання верстата 3Г833 не передбачає наявності вузлів для реалізації додаткових осцилюючих рухів інструмента [13], що обмежує можливості керування мікрогеометрією поверхні в автоматичному режимі. Нижче наведено порівняльний аналіз технічних характеристик наступної моделі обладнання.

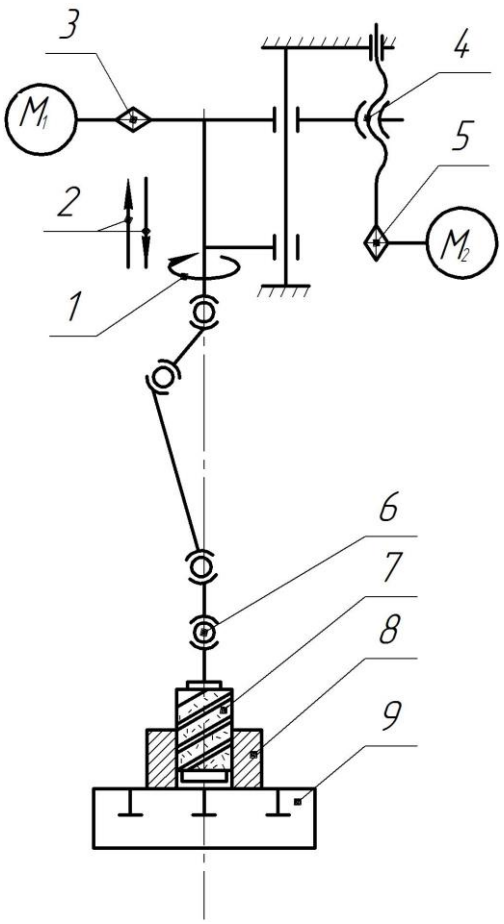


Рис.1.1 Структурна схема верстата 3Г833

1 – обертальний рух; 2 – зворотно-поступальний рух; 3 – елемент налаштування головного руху; 4 – гвинтова передача; 5 – елемент налаштування руху подач; 6 – двошарнірний кардан; 7 – інструмент; 8 – деталь; 9 – стіл; M_1 – електродвигун головного руху; M_2 – електродвигун руху подач.

1.3. Аналіз і синтез верстатів 3М83 та 3Н85

Хонінгувальні верстати моделей 3М83 та 3Н85 [13] характеризуються високим ступенем конструктивної уніфікації, маючи ідентичну кінематичну структуру та склад виконавчих елементів. Аналіз розробленої структурної схеми (рис. 1.2) свідчить, що головний рух різання (обертання шпинделя з інструментом) реалізується за допомогою електромеханічного привода. Дана архітектура привода головного руху є аналогічною до попередньо розглянутої моделі, що забезпечує стабільність кутової швидкості при варіаціях моменту сили різання. Кінематика виконавчого руху подачі має зворотно-поступальний характер і забезпечується лінійним гідравлічним приводом (гідроциліндром), що дозволяє досягти необхідної плавності ходу та безступінчастого регулювання

швидкості. Разом з тим, кінематична структура даного обладнання не містить механізмів для генерування та накладання додаткових осцилюючих рухів на інструмент

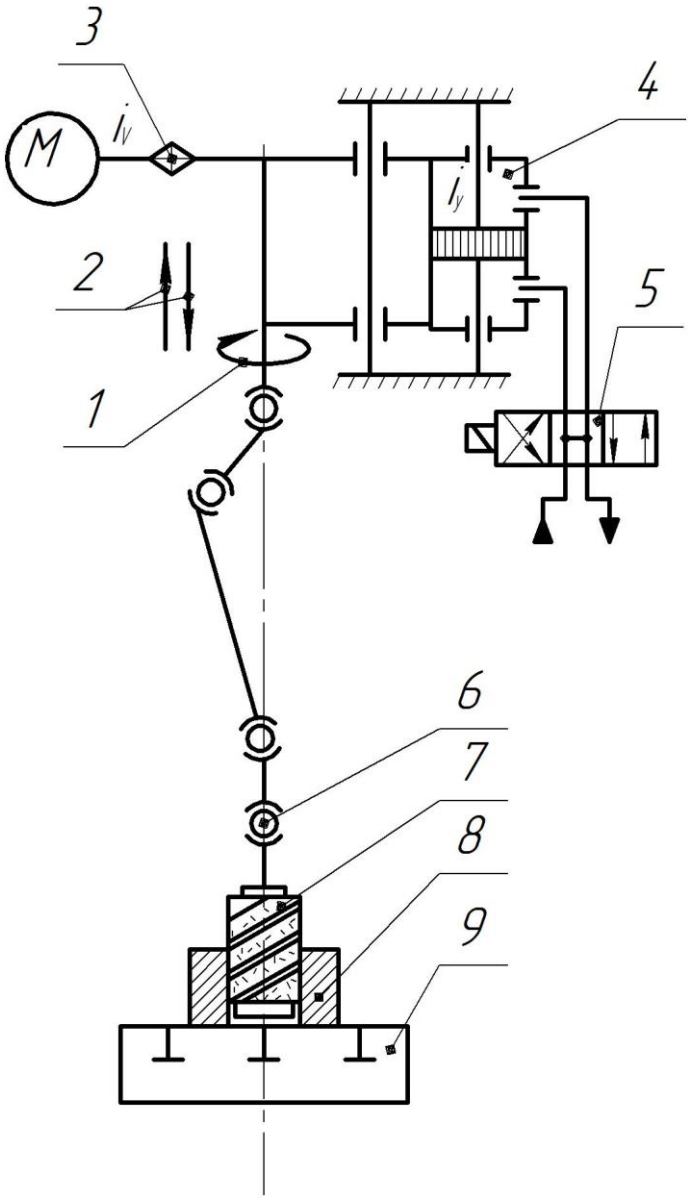


Рис.1.2 Структурна схема верстатів 3М83 та 3Н85

1 – обертальний рух; 2 – зворотно-поступальний рух; 3 – елемент налаштування головного руху; 4 – гідравлічний циліндр; 5 – гідро розподільник; 6 – двошарнірний кардан; 7 – інструмент; 8 – деталь; 9 – стіл; М1 – електродвигун головного руху.

1.4. Аналіз і синтез верстата з круговою та осьовою осциляцією

На основі аналізу джерел [13, 75, 79] розроблено структурну кінематичну схему досліджуваного верстата.

Відповідно до представленої архітектури (рис. 1.3), головний рух різання (обертання інструмента) та виконавчий рух подачі (зворотно-поступальне переміщення) реалізуються за допомогою незалежних електромеханічних приводів.

Відмінною рисою кінематики даного обладнання є наявність спеціалізованих вузлів для генерування та накладання додаткових осцилюючих рухів — осьового та кругового (тангенціального):

Осьова осциляція накладається на базове зворотно-поступальне переміщення шпинделя за допомогою кривошипного механізму, який отримує рух від окремого електромеханічного привода. Це дозволяє інтенсифікувати зрізання мікронерівностей та покращити умови стружковідведення.

Кругова (тангенціальна) осциляція формується на базі диференціального механізму, що включає конічну та черв’ячну зубчасті передачі. Конічна пара забезпечує передачу базової кутової швидкості на інструмент. Водночас черв’ячна передача кінематично пов'язана з кривошипно-кулісним механізмом. Використання диференціала дозволяє здійснювати суперпозицію (алгебраїчне сумування) рівномірного обертання шпинделя та змінної швидкості куліси. Як наслідок, генерується гармонічна варіація кутової швидкості інструмента в процесі різання. Для більш комплексного аналізу впливу складної кінематики на параметри обробки, доцільно розглянути структурну схему ще однієї моделі верстата, оснащеної механізмами осциляції [78]. Реалізація головного руху різання (обертання інструмента) та виконавчого зворотно-поступального руху подачі здійснюється за допомогою електромеханічного привода.

1.5. Аналіз і синтез хонінгувально-доводочного верстата

Генерування кругової (рис. 1.4) (тангенціальної) осциляції забезпечується кінематичним ланцюгом на базі конічного диференціального механізму. Конструктивною особливістю даного вузла є виконання осі сателітів у формі Z-подібного вала, який кінематично пов’язаний зі шпинделем верстата. Обертання цього вала навколо власної осі генерує додаткові кругові коливання, що

накладаються на інструмент. При цьому диференціал виконує функцію кінематичного суматора, здійснюючи суперпозицію основного обертального руху та кругової осциляції. Як наслідок, результуюча кутова швидкість шпинделя набуває безперервно змінного (пульсуючого) характеру.

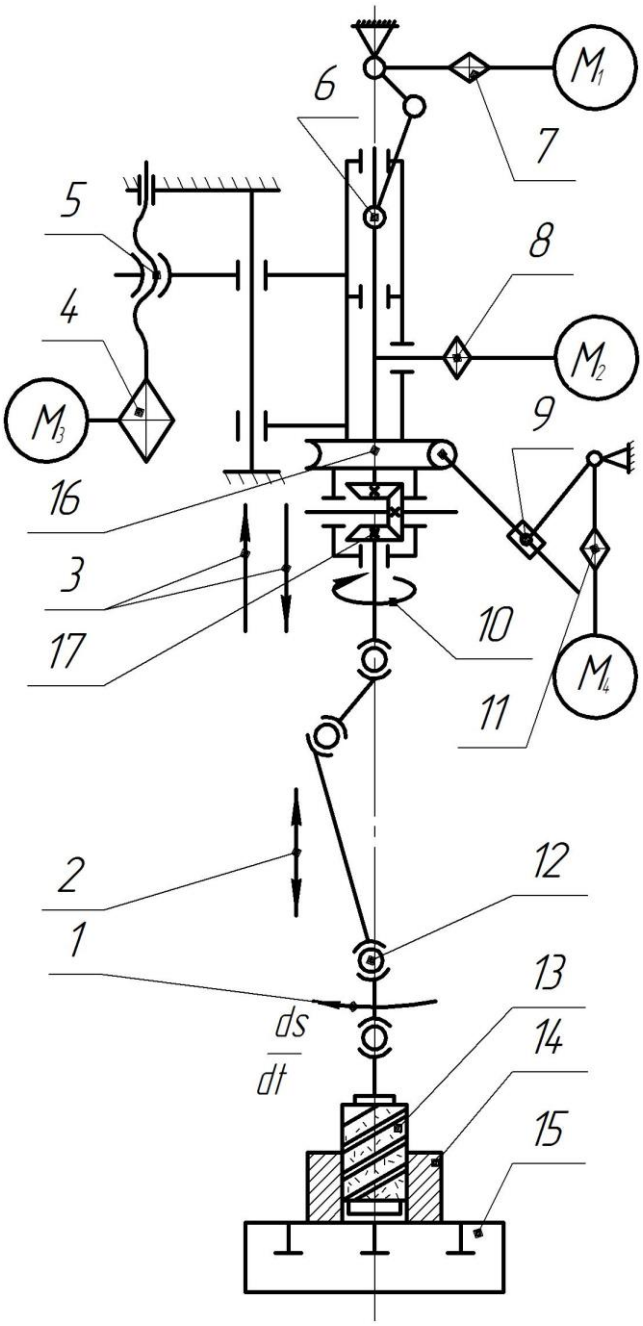


Рис.1.3 Структурна схема верстатів з круговою та осьовою осциляцією.

1 – кругова осциляція; 2 – осьова осциляція; 3 – зворотно-поступальний рух; 4 – елемент налаштування привода подач; 5- гвинтова передача 6 – кривошипно-повзуний механізм; 7 – елемент налаштування осьової осциляції; 8 – елемент налаштування головного руху; 9 – кривошипно-кулісний механізм; 10 – обертальний рух; 11 – елемент налаштування кругової осциляції; 12 – двошарнірний кардан; 13 – інструмент; 14 – деталь; 15 – стіл; 16 – черв'ячна передача; 17 – конічна передача; М1 – електродвигун осьової осциляції; М2 – електродвигун головного руху; М3– електродвигун руху подач; М4 – електродвигун кругової осциляції.

Механізм осьової осциляції реалізовано на базі двох торцевих кулачків. Їхня кінематична взаємодія відбувається через проміжні тіла кочення (кульки) з опорною шайбою, яка отримує обертальний рух від зубчастої передачі.

Для розширення бази порівняльного аналізу доцільно розглянути кінематичну структуру ще однієї моделі верстата, оснащеної вузлами генерування осцилюючих рухів [91

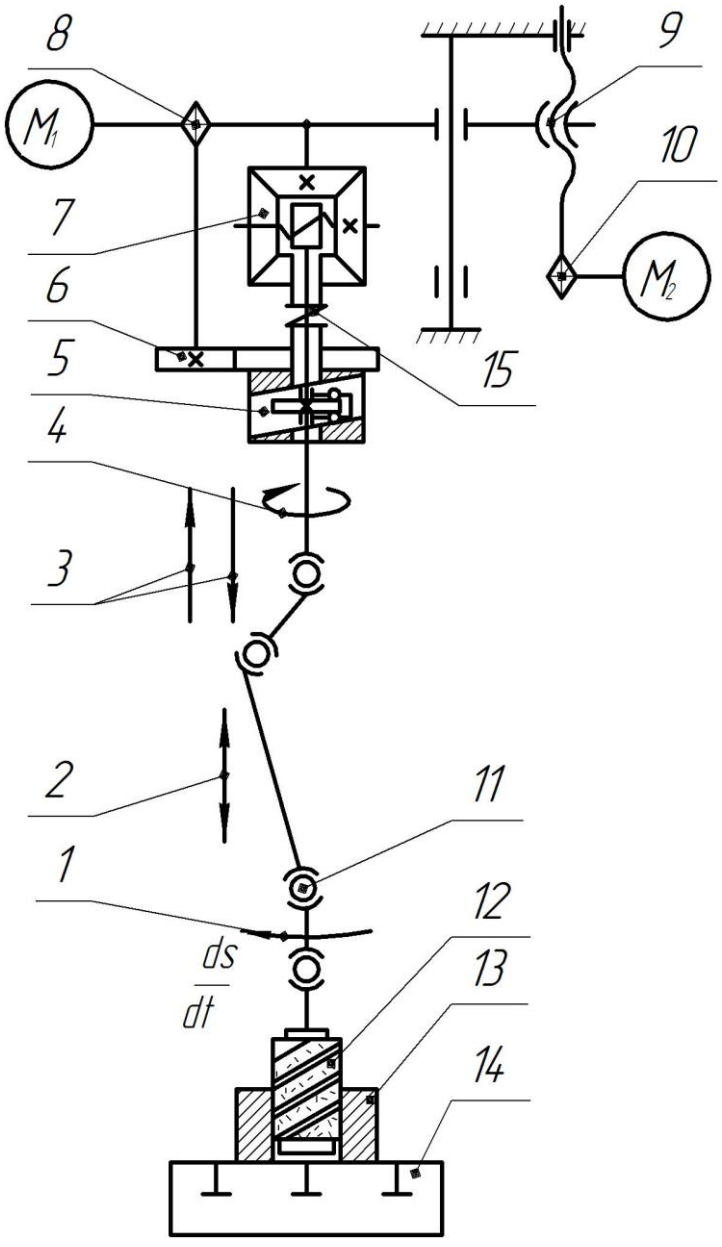


Рис. 1.4. Структурна схема хонінгувально-доводочного верстата.

1 – кругова осциляція; 2 – осьова осциляція; 3 – зворотно-поступальний рух; 4- обертальний рух; 5 – механізм осьової осциляції; : 6- зубчата передача; 7- механізм кругової осциляції; 8 – елемент налаштування головного руху; 9 – гвинтова передача; 10 – елемент налаштування зворотно-поступального руху; 11 – двошарнірний кардан; 12 – інструмент; 13 – деталь; 14 – стіл; 15 – муфта. М1– електродвигун головного руху; М2– електродвигун руху подач;

Кінематика головного руху (обертання інструмента) та зворотно-поступальної подачі реалізується від незалежних електромеханічних приводів. Формування кругової осциляції базується на застосуванні конічного диференціального механізму. Його конструктивною особливістю є виконання водила (осі сателітів) у вигляді Z-подібного вала, кінематично пов'язаного зі шпинделем. Обертання цього вала генерує тангенціальні коливання, при цьому диференціал відіграє роль кінематичного суматора, що накладає осциляцію на основне обертання та формує пульсуючий швидкісний режим. Для забезпечення осьової осциляції застосовано торцевий кулачково-кульковий механізм, де опорна шайба отримує обертання через зубчасту передачу. Подальший структурний аналіз доцільно провести на прикладі кінематичної схеми верстата [91].

1.6. Аналіз і синтез хонінгувального верстата [91].

Структурно-кінематичну схему досліджуваного верстата наведено на рис. 1.5. Принциповою конструктивною відмінністю даної моделі є інверсія кінематики: головний рух різання (обертання) передається не інструменту, а безпосередньо заготовці (деталі). Цей рух реалізується за допомогою незалежного електромеханічного привода.

Виконавчий рух подачі (зворотно-поступальне переміщення) також здійснюється заготовкою. Відповідний кінематичний ланцюг базується на електромеханічному приводі, обертальний рух якого трансформується у лінійне переміщення вузла за допомогою гвинтової передачі.

Натомість рухи осциляції просторово розділені з основними рухами і надаються інструменту (шпинделю верстата):

Осьова осциляція: генерується електродвигуном, обертальний рух від якого за допомогою кривошипно-шатунного механізму перетворюється у лінійний коливальний рух. Далі через гвинтову передачу ця вібраційна складова накладається на шпиндель.

Кругова (тангенціальна) осциляція: формується за аналогічним принципом. Обертання від привідного двигуна через кривошипний механізм трансформується

у знакозмінний (коливальний) обертальний рух, який передається на шпиндель через зубчасту передачу.

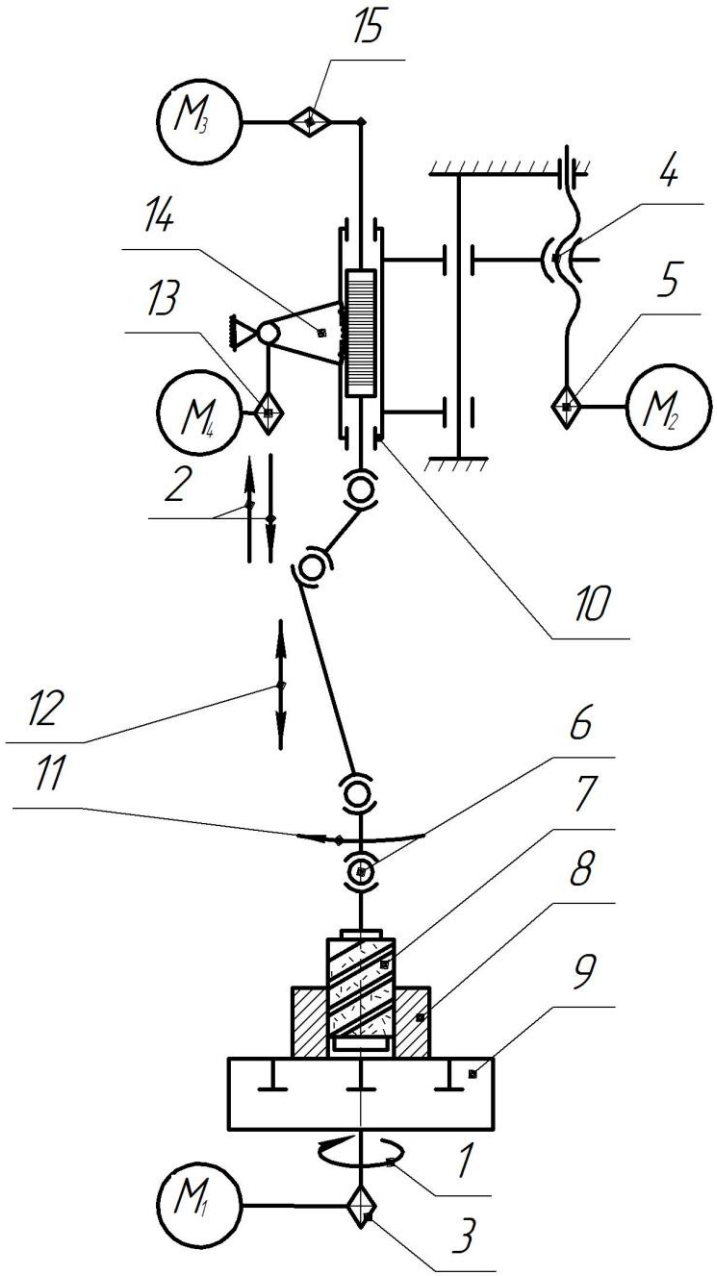


Рис. 1.5. Структурна схема хонінгувального верстата.

1 – обертовий рух; 2 – зворотно-поступальний; 3 – елемент налаштування головного руху; 4 – гвинтова передача; 5 – елемент налаштування руху подач; 6 – двошарнірний кардан; 7 – інструмент; 8 – деталь; 9 – стіл; 10 – шпиндель; 11 – рух кругової осциляції; 12 – осьової осциляції; 13 – елемент налаштування осьової осциляції; 14 – рейкова передача; 15 – елемент налаштування кругової осциляції.;М1 – електродвигун головного руху; М2 – електродвигун руху подач; М3– електродвигун кругової осциляції; М4 – електродвигун осьової осциляції.

На підставі проведеного структурного аналізу існуючого парку верстатів, здійснимо їхню комплексну класифікацію та визначимо відповідні рівні автоматизації згідно з методологією, наведеною у праці [21].

1.7 Висновки

За результатами структурно-кінематичного аналізу існуючого парку хонінгувального обладнання встановлено наступне:

Надмірна концентрація рухів: Суттєвим недоліком більшості проаналізованих конструкцій є зосередження всього комплексу формоутворюючих рухів на інструментальному шпинделі. Це призводить до невиправданого ускладнення кінематики, збільшення маси рухомих частин та, як наслідок, зниження динамічної жорсткості верстатної системи.

Обмежені технологічні можливості базових моделей: Встановлено, що класичні верстати серій 3Г833, 3Н85 та 3М83 не оснащені вузлами для генерування осцилюючих рухів, що унеможливлює інтенсифікацію процесу різання та адаптивне керування мікрогеометрією поверхні.

Конструктивна складність існуючих аналогів: У тих моделях верстатів, де кінематична схема передбачає накладання осциляції, механізми її реалізації (наприклад, диференціали або складні кулачкові системи) характеризуються високою структурною складністю, що негативно впливає на їхню експлуатаційну надійність.

Диференціація кінематики: Забезпечити раціональний розподіл виконавчих рухів між обома взаємодіючими підсистемами (інструментом та заготовкою). Це дозволить розвантажити шпиндельний вузол та підвищити точність обробки.

Інтеграція осциляції на базі спрощених рішень: Передбачити обов’язкову наявність механізмів осциляції в кінематичній структурі верстата. При цьому необхідно синтезувати нові, структурно прості та надійні конструктивні рішення для їхньої генерації (наприклад, з використанням незалежних сервоприводів або механотронних модулів).

РОЗДІЛ 2
ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Продукційний хонінгувальний верстат

Створення сучасних високопродуктивних автоматизованих хонінгувальних верстатів неможливе без широкого впровадження принципів механотроніки. Для забезпечення стабільно високих показників якості оброблюваних деталей та ефективності технологічного процесу доцільно застосовувати інтегровану механотронну верстатну систему з чітко розподіленими функціональними підсистемами [1].

Аналіз існуючого обладнання [2–4] виявив низку суттєвих недоліків. Ключовою проблемою є надмірна концентрація формоутворюючих рухів на інструментальному шпинделі, що призводить до невиправданого ускладнення кінематики та конструкції верстата. Традиційно така концентрація обґрунтовується прагненням мінімізувати інерційні навантаження, оскільки маса хонінгувальної головки зазвичай значно менша за масу заготовки [2, 4].

Водночас у горизонтально-хонінгувальних верстатах головний обертальний рух часто передається саме деталі, що зумовлено специфікою обробки тіл обертання [2, 4]. Важливим кінематичним аспектом є також проблема самовстановлення інструмента. Для компенсації неспіввісності інструмента та отвору традиційно застосовують шарнірне кріплення хона. Проте під дією осьових зусиль різання та радіального розтискання брусків навіть двошарнірне з'єднання втрачає свою ефективність: вісь інструмента жорстко орієнтується і прагне суміститися з віссю шпинделя верстата [4].

З огляду на зазначене, раціональним конструктивним кроком є просторова диференціація рухів — зокрема, передача обертального руху безпосередньо виробу (з обов'язковим урахуванням його масогабаритних характеристик). Додатковим аргументом на користь модернізації є висока структурна складність традиційних механізмів генерування осцилюючих рухів.

За результатами проведеного аналізу сформовано комплекс технічних вимог до проектування механотронного хонінгувального верстата, що працюватиме в умовах адаптивного керування процесом:

1. Технологічне призначення верстата

1.1. Прецизійна обробка методом хонінгування деталей малих та середніх габаритів.

1.2. Діапазон діаметрів оброблюваних отворів: від 10 мм до 150 мм.

1.3. Допустимі габаритні розміри заготовок: від 165х48,5х100 мм до 169х162х248 мм.

1.4. Інструментальне оснащення: використання інструмента типу ПГХ.

2. Архітектура та компонування вузлів

2.1. Верстат має вертикальне компонування (осі інструментального шпинделя та шпинделя виробу розташовані вертикально та співвісно).

2.2. Застосовано модульний принцип побудови, що включає автономні блоки:

гідравлічну станцію;

станцію підготовки та подачі МОР;

стійку системи ЧПК.

2.3. Основний (базовий) модуль верстата інтегрує такі вузли:

станину (опорну базу для монтажу виконавчих механізмів);

гідроциліндр осьової подачі інструмента;

гідравлічний сервопривод шпинделя виробу;

гідравлічний сервопривод механізму осьової осциляції;

гідростатичний привод системи радіального розтискання (СРРР).

3. Кінематика формоутворюючих рухів робочих органів

3.1. Шпиндель виробу здійснює головний обертальний рух із заданою кутовою швидкістю.

3.2. Сервопривод шпинделя виробу виконує функцію сенсора, формуючи вхідний інформаційний сигнал на основі поточного значення фактичного крутного моменту різання.

3.3. Сервопривод інструментального шпинделя генерує осцилюючий рух із попередньо налаштованою амплітудою (λ) та керованою частотою (υ).

3.4. Автоматичне керування частотою осциляції (υ) реалізується шляхом безступінчастої зміни витрати робочої рідини в гідромоторі відповідного сервопривода.

4. Вимоги до системи автоматичного керування (САК)

4.1. Керування переміщеннями всіх робочих органів інтегровано в єдине функціональне середовище — гідравлічне. Виконавчі та керуючі елементи утворюють зв'язану термодинамічну систему, об'єднану потоком робочої рідини.

4.2. Алгоритм адаптивного керування реалізується через:

динамічне варіювання швидкостей формоутворюючих рухів методом дросельного регулювання;

встановлення дроселюючих апаратів на виході з гідродвигунів (регулювання «на зливі» для підвищення жорсткості системи);

керування прохідним перерізом дроселів залежно від перепаду тиску в керуючих камерах золотникових розподільників.

З урахуванням наведених вище вимог синтезовано та розроблено функціональну схему механотронного продукційного хонінгувального верстата з адаптивно-програмним керуванням (надалі — МХВАПК), яку представлено на рис. 2.1.

Архітектурно-компонувальні рішення механотронного продукційного хонінгувального верстата з адаптивно-програмним керуванням (МПХВАПК) доцільно проаналізувати на базі розробленої функціональної схеми (рис. 2.1).

Відповідно до представленої структури, апаратна частина верстатної системи інтегрує п’ять базових функціональних модулів: привод зворотно-поступального руху інструмента, привод обертального руху заготовки, механізм кругової осциляції, систему регулювання радіального розміру (СРРР) та пристрій числового програмного керування (ПЧПК).



Рис. 2.1 – Функціональна схема МПХВАПК

Структурний аналіз доцільно розпочати з модуля ПЧПК, оскільки він відіграє роль керівної системи, здійснюючи централізований контроль та координацію роботи всіх виконавчих підсистем. До складу цього модуля входять: підсилювачі вхідних сигналів, блоки аналого-цифрового (АЦП) та цифро-аналогового перетворення (ЦАП), а також безпосередньо мікропроцесорний блок ЧПК.

Інші функціональні підсистеми мають таку структуру:

Модуль привода зворотно-поступального руху інструмента: включає приводний електродвигун, гідронасос, керуючий гідророзподільник (золотник), виконавчий лінійний гідроциліндр та давач лінійного положення шпинделя.

Модуль привода обертального руху виробу (заготовки): складається з гідронасоса, виконавчого гідромотора та давача диференціального тиску для моніторингу силових параметрів.

Модуль механізму кругової осциляції: реалізований на базі електричного крокового двигуна, диференціального механізму та давача кутової швидкості (енкодера).

Модуль системи регулювання радіального розміру (СРРР): інтегрує слідкуючий однокромковий гідрозолотник та безпосередньо виконавчий механізм розтискання брусків.

Базуючись на функціональній структурі та компонуванні зазначених модулів, розроблено принципову гідрокінематичну схему МПХВАПК (рис. 2.2).

Згідно з розробленою гідрокінематичною схемою, головний рух різання (обертання) передається безпосередньо шпинделю виробу за допомогою гідромотора 30. Така кінематична конфігурація зумовлює найвищу ефективність використання даного верстата для обробки деталей класу «тіла обертання».

Виконавчий рух подачі (зворотно-поступальне переміщення) надається інструментальному шпинделю від гідроциліндра 23. Застосування гідравлічного лінійного привода забезпечує системі вагомі переваги: високу надійність, експлуатаційну довговічність, плавність ходу та точність реверсування. Притаманні гідроприводам недоліки, такі як порівняно нижча швидкодія та інерційність, ефективно компенсуються алгоритмами керування, інтегрованими в систему ПЧПК 6.

Для детальнішого розуміння динаміки процесу, розглянемо конструктивні особливості привода зворотно-поступального руху [5].

Жорстка фіксація інструментального шпинделя у вихідному (базовому) положенні забезпечується підсистемою, що включає керуючий гідророзподільник 20 та виконавчий блокувальний гідроциліндр 21. Алгоритм роботи даного вузла полягає в наступному: при подачі робочої рідини під тиском у порожнину гідроциліндра 21 відбувається розфіксація (вивільнення) шпинделя для здійснення робочого циклу. Відповідно, при знятті керуючого сигналу та падінні тиску, шпиндель надійно стопориться за допомогою механічного фіксатора 22.

Специфічною конструктивною особливістю розробленого гідропривода зворотно-поступального руху є інтеграція в систему гідроакумулятора 15, робота якого координується системою ПЧПК 6.

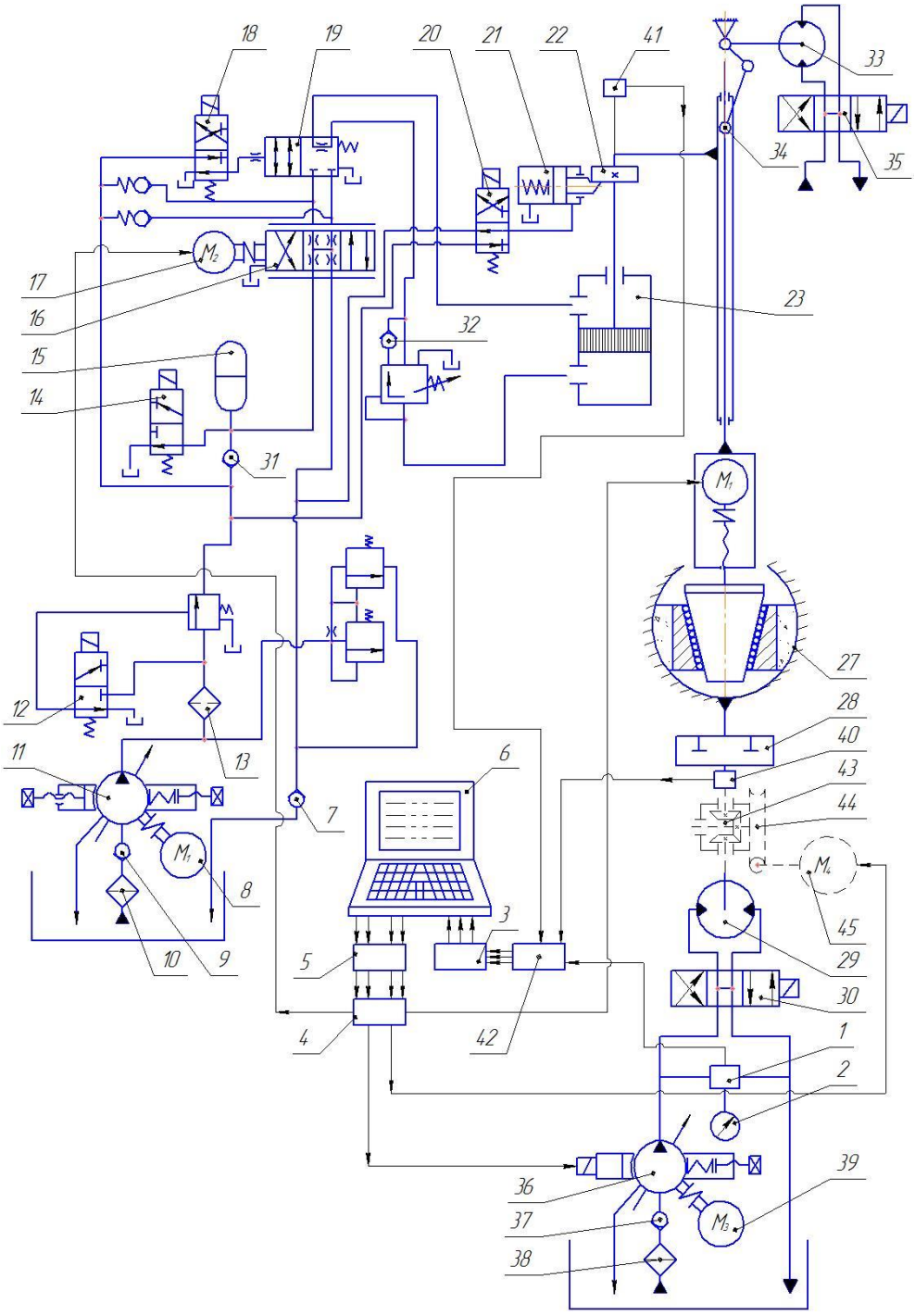


Рис.2. 2 Гідро-кінематична схема МПХВАПК

1 – диференційний датчик тиску; 2 – манометр; 3 – АЦП; 4 – підсилювач; 5 – ЦАП; 6 – пристрій числового програмного керування; 7,9,31,32,37 – зворотній клапан; 8,39 – електродвигун; 10,13,38 – фільтр; 11,36 – пластинчатий регулює мий насос; 12,14,16,18,19,20 – гідрозолотник; 15 – гідроакумулятор; 17 – кроковий електродвигун; 21 – гідроциліндр; 22 – фіксатор; 23 – гідроциліндр приводу зворотно-поступального руху; 24 – СРРР; 25,30,35 – гідророзподільники; 26 - слідкуючий одно кромковий золотник в магістралі зливу СРРР; 27 – деталь, що оброблюється; 28 – стіл; 29,33 – гідромотор; 34 – кривошипно-повзуний механізм; 40 – датчик кількості обертів; 41 – датчик положення шпинделя; 42 – підсилювач; 43 – диференціал; 44 – черв’ячна передача; 45 – кроковий електродвигун.

Застосування гідроакумулятора 15 функціонально зумовлено необхідністю демпфування гідравлічних ударів (пульсацій тиску) та компенсації пікових витрат робочої рідини в моменти високодинамічного реверсування напрямку руху шпинделя. Для безпечного скидання тиску та розвантаження гідроакумулятора 15 у гідрокінематичній схемі передбачено спеціальний розвантажувальний гідророзподільник 14.

Керування дозволом на виконання виконавчого зворотно-поступального руху реалізовано на базі блокувального гідророзподільника 18. При його перемиканні в робочу позицію потік робочої рідини спрямовується через направляючий гідророзподільник 19 безпосередньо у відповідну робочу порожнину головного приводного гідроциліндра 23, ініціюючи лінійне переміщення шпиндельного вузла.

Ключовим елементом керування системою виступає пристрій ЧПК (ПЧПК) 6, який через відповідний електронний драйвер здійснює керування кроковим електродвигуном 17. Ротор даного двигуна кінематично пов'язаний з передачею «гвинт-гайка», яка трансформує обертальний рух у лінійне переміщення пілота (керуючого каскаду) пропорційного гідророзподільника 16. Останній забезпечує безперервне та плавне регулювання напрямку потоку й об'ємної витрати робочої рідини в магістралях, що сполучені з порожнинами виконавчого гідроциліндра 23 через направляючий гідророзподільник 19.

Для організації замкненого контуру керування (зворотного зв'язку) щодо поточного положення шпинделя, на штоку гідроциліндра 23 змонтовано давач лінійних переміщень 41. Інформативний сигнал від давача генерується у форматі послідовності електричних імпульсів, які транслюються до обчислювального блоку ПЧПК. При цьому частота проходження імпульсів є прямо пропорційною поточній швидкості переміщення шпинделя, а їхня сумарна кількість визначає абсолютну координату (величину ходу). Блок-схему алгоритму функціонування привода зворотно-поступального руху МПХВАПК наведено на рис. 2.1.3.

Важливою технологічною перевагою проектованого МПХВАПК є наявність модулів кругової та осьової осциляції інструмента:

Кругова (тангенціальна) осциляція генерується за допомогою конічного диференціала 43, кінематично пов'язаного з черв'ячною передачею 44, яка отримує обертання від незалежного крокового електродвигуна 45. Механізм працює за принципом суперпозиції рухів: кроковий двигун 45, під керуванням ПЧПК, генерує знакозмінний рух із заданою частотою, який у диференціалі 43 алгебраїчно сумується з постійною складовою основного обертального руху. Моніторинг кінематичних параметрів (амплітуди та частоти коливань) здійснюється за допомогою давача кутової швидкості (енкодера). Зміна частоти обертання ротора ідентифікується системою як амплітуда коливань, а кількість циклів зміни напрямку визначає частоту осциляції. Застосування крокового привода в контурі кругової осциляції забезпечує гнучке, безступінчасте регулювання кінематичних параметрів, що відкриває можливості для програмного синтезу будь-яких раціональних траєкторій руху абразивних зерен без механічних обмежень (алгоритм роботи відображено на рис. 2.1.3).

сьова осциляція реалізується на базі автономного гідромеханічного привода у поєднанні з кривошипно-шатунним перетворювачем руху, що накладає високочастотні лінійні вібрації на базовий рух подачі.

Підсумовуючи вищевикладене, слід зазначити, що архітектура спроектованого верстата базується на принципі раціональної диференціації виконавчих рухів. Просторове розділення кінематики — передача головного обертального руху безпосередньо заготовці (деталі) та збереження зворотно-поступального переміщення з осциляцією за інструментом — дозволило суттєво розвантажити шпиндельний вузол, мінімізувати інерційні навантаження та оптимізувати загальну конструкцію верстатної системи.

Інтеграція гідравлічного привода зворотно-поступального переміщення із системою числового програмного керування (ЧПК) дозволила ефективно мінімізувати основні експлуатаційні недоліки, притаманні традиційним гідравлічним системам (зокрема, інерційність спрацьовування, нестабільність швидкості при зміні навантаження та похибки позиціонування)

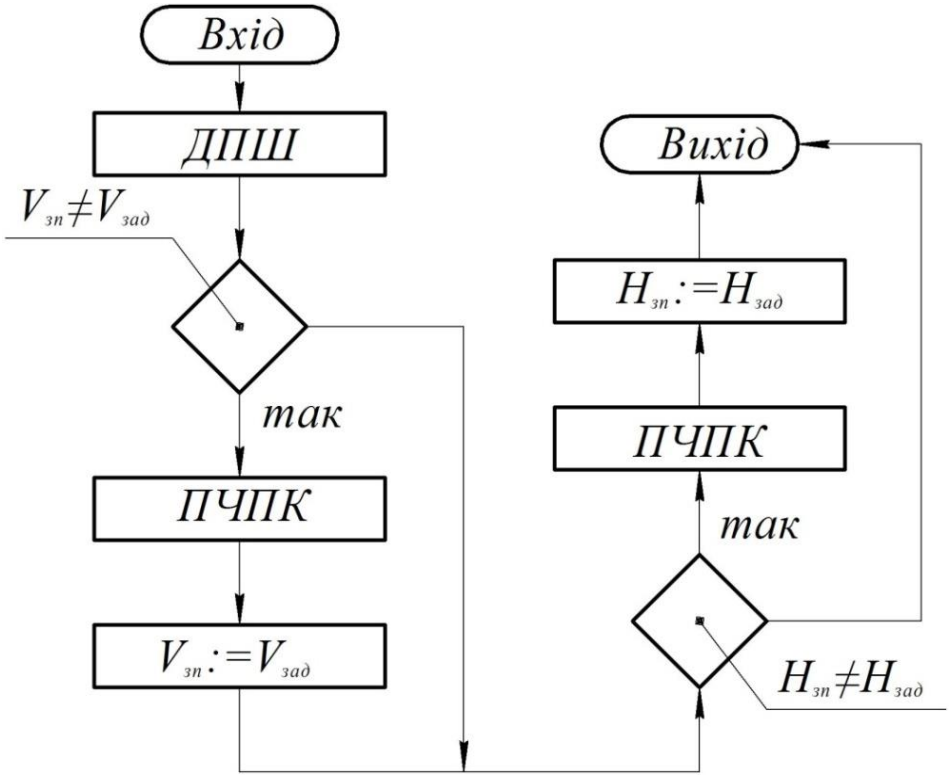


Рис.2.3 Алгоритм роботи приводу зворотно-поступального руху МПХВАПК

ДПШ – датчик положення шпинделя; $V_{зп}$ – швидкість зворотно-поступальних рухів; $V_{зад}$ – задана швидкість зворотно-поступальних рухів; $H_{зп}$ – кількість зворотно-поступальних рухів; $H_{зад}$ – задана кількість зворотно-поступальних рухів;

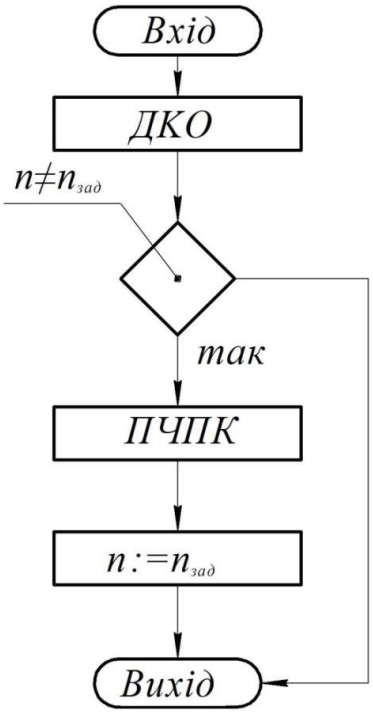


Рис. 2. 4 Алгоритм роботи кругової осциляції МПХВАПК

ДКО – датчик кількості обертів; n – кількість обертів гідромотору; $n_{зад}$ – задана кількість обертів гідромотору;

Застосування крокового електродвигуна як привода механізму кругової осциляції забезпечує безступінчасте та гнучке регулювання частоти й амплітуди коливань, ефективно усуваючи кінематичні обмеження, притаманні традиційним механічним системам. У підсумку, розроблена верстатна система повністю відповідає сучасним критеріям проектування механотронних комплексів завдяки глибокій інтеграції алгоритмів адаптивно-програмного керування всіма виконавчими вузлами/

2.2. Аналіз утворення траєкторії руху зерна інструменту на продукційному верстаті з СРРР з адаптивним програмним керуванням.

Аналіз методів кінематичного формоутворення траєкторій руху інструмента (зокрема, його абразивних або алмазних зерен), наведений у підрозділі 1.5, свідчить про те, що генерація складних просторових траєкторій є ефективним засобом керування процесом формування мікрорельєфу поверхні [2].

Для цілеспрямованого впливу на цей процес на базову кінематику інструмента накладають додаткові коливальні рухи. Відповідно, ключовою вимогою для прецизійного керування мікротопографією оброблюваної поверхні є наявність гнучкої системи керування виконавчими механізмами осциляції.

Як зазначалося в роботі [2], суперпозиція кругової (тангенціальної) та осьової осциляції ініціює рух різальних зерен за траєкторіями, що описуються фігурами Ліссажу. Це дозволяє сформувати на деталі оптимальну перехресну сітку мікрослідів. Густота цієї сітки безпосередньо залежить від кінематичного співвідношення частот кругових та осьових коливань.

Проте існуючий парк верстатного обладнання має низку суттєвих обмежень щодо ефективної генерації таких траєкторій [2]:

Відсутність адаптивності керування: Верстати, кінематичні схеми яких наведені на рис. 2.2.1 та 2.2.2, потенційно здатні формувати фігури Ліссажу. Однак їхнім головним недоліком є відсутність гнучких систем керування приводами осциляції, що унеможливлює оперативний і точний підбір оптимального співвідношення частот коливань у процесі обробки.

Жорстка структура кінематики: Конструкція верстата, представлена на рис. 2.2.3, базується на жорстких кінематичних зв'язках між виконавчими ланками. Таке структурне обмеження не дозволяє створити раціональні умови для генерування заданих фігур Ліссажу та незалежного регулювання параметрів осциляції [75, 78, 80].

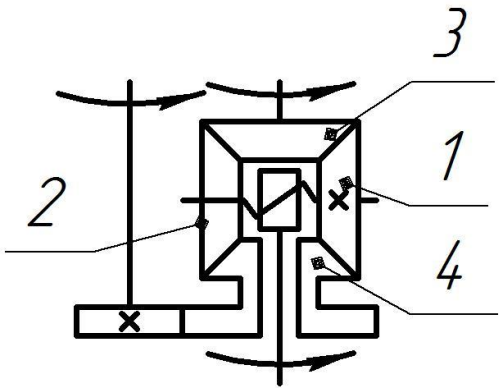


Рис. 2.2.1 Диференціал хонінгувально-доводочного верстата [11,12,13]

1 – жорсткий сателіт; 2 – вільний сателіт; 3,4 – центральні колеса.

Крім того, кінематична працездатність диференціального механізму зазначеного верстата викликає обґрунтовані сумніви, оскільки його центральні колеса 3 і 4 обертаються з різними кутовими швидкостями, будучи при цьому кінематично замкненими на спільні сателіти 1 і 2 [82, 92, 93].

З огляду на це, сформулюємо ключові вимоги до систем керування процесом формування мікротопографії (мікрорельєфу) оброблюваної поверхні виробу:

Забезпечення просторової кінематики для генерації складних траєкторій різання у вигляді фігур Ліссажу.

Наявність системи гнучкого (безступінчастого) регулювання частотних параметрів коливальних рухів.

Враховуючи наведені критерії, дослідимо закономірності формоутворення траєкторії руху інструмента на прикладі продукційного верстата, оснащеного системою регулювання радіального розміру (СРРР) на базі гідростатичної хонінгувальної головки (ГСТХ) з адаптивно-програмним керуванням.

Конструктивно механізм осьової осциляції даного верстата (рис. 1.5.3) реалізований на базі кривошипно-повзунного перетворювача руху 34, привод якого здійснюється від гідравлічного двигуна 33.

Графічна модель траєкторії руху одиничного абразивного зерна за умови наявності осьової осциляції, постійної швидкості головного обертального руху (V= const) та фіксованого проміжку часу (t = const), яка подана у вигляді розгортки на площині та розбита на окремі кадри (циклограми), наведена на рис. 1.2.17. Варто зауважити, що тривалість розрахункового переміщення зерна лімітується часом (періодом) одного повного циклу осьової осциляції. Саме цей часовий інтервал приймається за базовий параметр для математичного моделювання та побудови всіх подальших траєкторій руху інструментального оснащення.

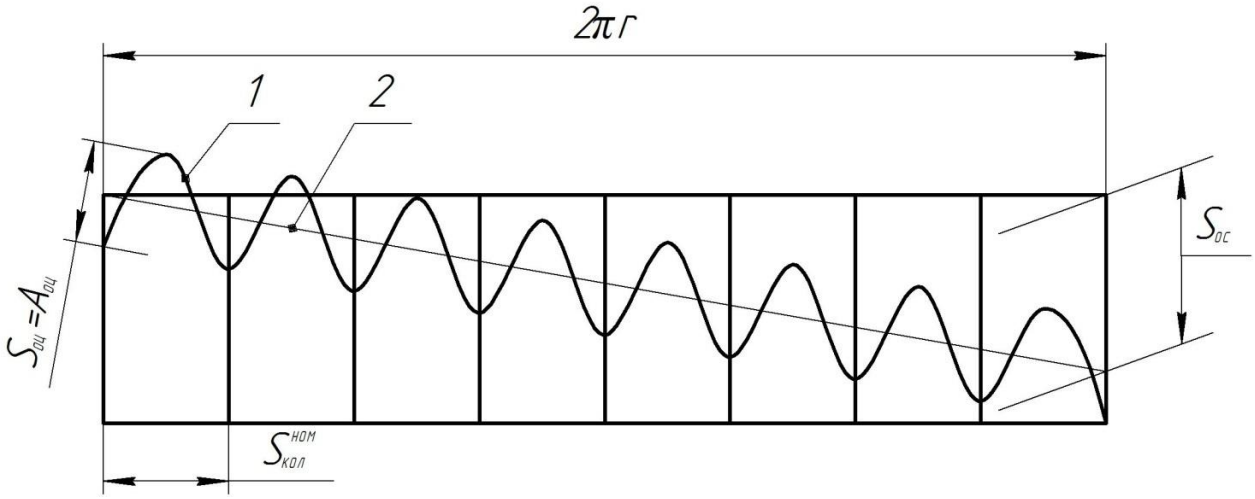


Рис. 2.2.2 Покадрова схема траєкторії руху зерна інструмент при осьовій осциляції розгорнута на площину.

1 – траєкторія руху зерна інструменту; 2 – гвинтова лінія; $A_{ос}$ – амплітуда коливань;$S_{ос}$ – осьова подача; $S_{кол}^{ном}$ - номінальна колова подача; $S_{оц}$ – подача осьової осциляції; r – радіус кола;

Дана траєкторія руху буде визначатися за синусоїдальним законом і буде мати наступний вигляд [75]:

$$X = V_o * t \qquad (2.2.1)$$

де X – координата точки на вісі X;

V_o – швидкість обертання;

t – час переміщення;

$$Y = A_{oc} sinn_{oc} t + V_{oc} t \quad (2.2.2)$$

де Y – координата точки на вісі Y;

A_{oc} – амплітуда осьових коливань;

n_{oc} – частота осьових коливань;

V_{oc} – швидкість поступального руху інструменту;

Для пов'язання синусоїдального закону з продукційним верстатом визначимо значення частоти осьових коливань.

$$n_{oc} = n_{дв} * i_{кп} \quad (2.2.3)$$

де $n_{дв}$ – частота обертання гідромотору;

$i_{кп}$ – передаточне відношення кривошипно-повзуного механізму.

Отримане значення частоти осьових коливань підставимо в рівняння 2.2.3.

$$Y = A_{oc} sin(n_{дв} * i_{кп})\, t + V_{oc} t \quad (2.2.4)$$

Дослідимо структуру та принцип дії механізму кругової (тангенціальної) осциляції, представленого на рис. 2.2.3. До його складу входять диференціальний механізм 43, гідравлічний мотор 29 та кроковий електродвигун 45. Гідромотор 29 забезпечує базове обертання з постійною кутовою швидкістю, тоді як кроковий двигун 45 генерує обертальний рух зі змінною (знакозмінною) частотою. Ці два кінематичні потоки алгебраїчно сумуються за допомогою диференціала 43. Наслідком такої суперпозиції рухів є безперервна зміна результуючої кутової швидкості обертання стола, що безпосередньо формує кругову осциляцію заготовки.

За умови сталої швидкості поступального (осьового) руху інструмента (V_{oc}= const) та фіксованого часу переміщення (t = const), траєкторія руху одиничного абразивного зерна в умовах кругової осциляції матиме характер, ідентичний траєкторії при осьовій осциляції. Головна кінематична відмінність полягає лише в тому, що вектор коливальної складової буде просторово орієнтований у перпендикулярному напрямку, описуючись при цьому аналогічною гармонічною (синусоїдальною) залежністю [75].

$$X = A_o sinn_o t + V_o t \quad (2.2.5)$$

де A_o – амплітуда кругових коливань;

$$Y = V_{oc} * t \quad (2.2.6)$$

Для пов'язання синусоїдального закону з продукційним верстатом визначимо значення частоти кругових коливань. Для цього необхідно більш детально розглянути диференціальний механізм (рис.2.2.3)

Передавальне відношення даного диференціалу визначається за формулою [93]:

$$i_{дф} = \frac{n_3 - n_2}{n_4 - n_2} \quad (2.2.7)$$

де $i_{дф}$ – передаточне відношення диференціалу;

n_2 – частота обертання колеса z_2;

n_3 – частота обертання колеса z_3;

n_4 – частота обертання колеса z_4;

Кількість зубів в конічній передачі однакове, тобто передаточне відношення буде дорівнювати -1, тоді рівняння 2.2.7 буде мати вигляд:

$$\frac{n_3 - n_2}{n_4 - n_2} = -1 \quad (2.2.8)$$

З рівняння 2.2.8 виведемо рівняння частоту обертання.

$$n_o = n_3 \pm 2n_2 \quad (2.2.9)$$

В отриманому рівнянні розкриємо значення частот обертання.

$$n_o = \frac{z_3}{z_4} n_{гд} \pm 2\frac{z_1}{z_2} n_{кд} \quad (2.2.10)$$

де $n_{гд}$ – частота обертання гідравлічного двигуна;

$n_{кд}$ – частота обертання крокового двигуна;

z_1, z_2, z_3, z_4 – кількість зубів відповідного колеса.

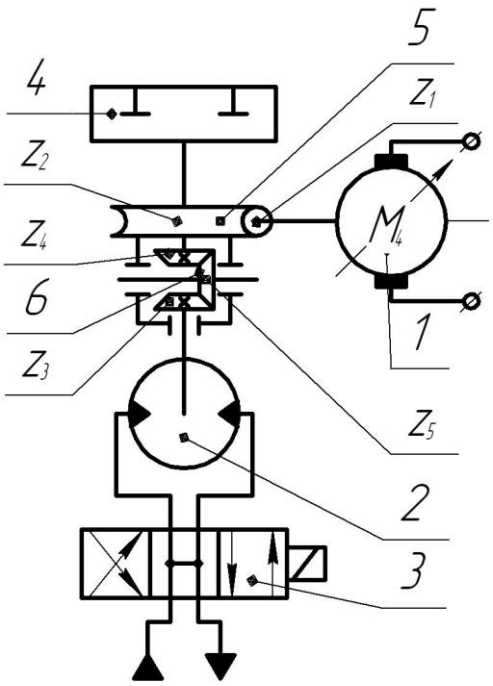


Рис.2.2.3 Диференціальний механізм продукційного верстата

1 – кроковий електродвигун; 2 – гідравлічний двигун; 3 – гідророзподільник; 4 – стіл; 5 – черв'ячна передача; 6 – конічна передача; z_1, z_2, z_3, z_4, z_5 – кількість зубів відповідного колеса.

Отримане значення частоти обертання підставимо в рівняння 2.2.5.

$$X = A_o sin\left(\frac{z_3}{z_4} n_{гд} \pm 2\frac{z_1}{z_2} n_{кд}\right) t + V_o t \qquad (2.5.11)$$

У результаті суперпозиції (одночасного накладання) кругової та осьової осциляцій формується складна комплексна траєкторія руху одиничного абразивного зерна. Розгортка цієї результуючої траєкторії на площину представлена на рис. 2.2.4.

Як свідчить аналіз отриманої графічної моделі (рис. 1.2.18)*, кінематика переміщення зерна має виражений нерівномірний характер: величина шляху, пройденого за рівні проміжки часу, безперервно змінюється. Така варіативність траєкторії вказує на постійну зміну модуля та напрямку вектора миттєвої швидкості різання, що аналітично описується наступною математичною залежністю:

$$S_{кол} = S_{кол}^{ном} \pm \Delta S_{кол} \qquad (2.2.13)$$

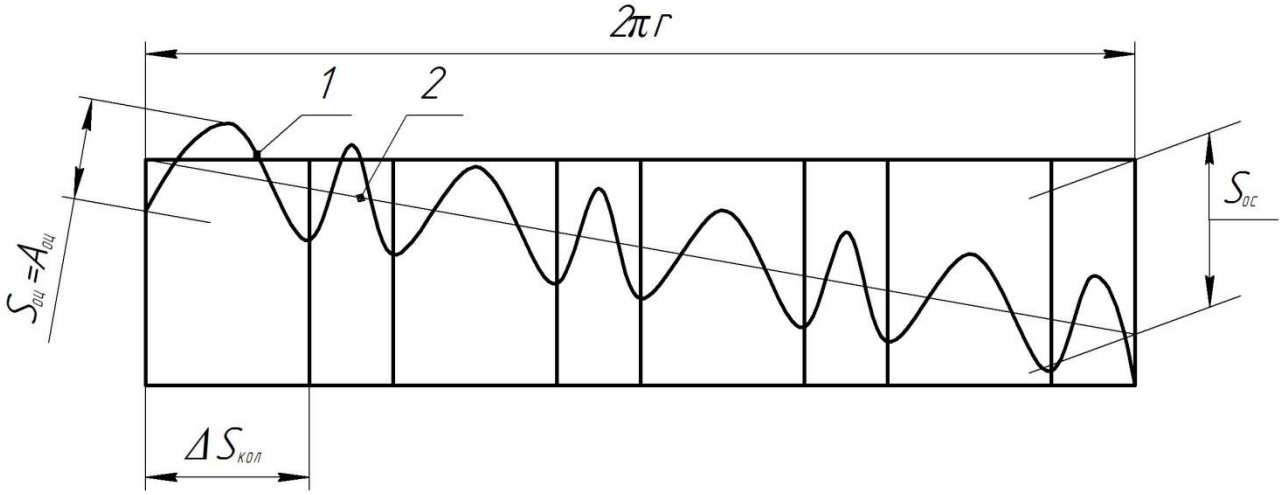


Рис.2.2.4 Покадрова схема траєкторія руху зерна інструменту при круговій і осьовій осциляції розгорнута на площину

1 – траєкторія руху; 2 – гвинтова лінія; $\Delta S_{кол}$ – зміна колової подачі.

Де номінальна колова подача $S_{кол}^{ном}$ буде визначатися наступною залежністю.

$$S_{кол}^{ном} = f(S_{ос}) \quad (2.2.14)$$

А зміна колова подача $\Delta S_{кол}$ буде теж визначатися залежністю.

$$\Delta S_{кол} = f(S_{оц}) \quad (2.2.15)$$

Слід зазначити, що дані залежності буде забезпечувати кроковий електричний двигун, який використовується в якості привода механізму колової осциляції і дає можливість змінювати швидкість без гранично і з різною частою.

Траєкторія зерен буде визначатися за наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} X = A_o sin\left(\frac{Z_3}{Z_4} n_{гд} \pm 2\frac{Z_1}{Z_2} n_{кд}\right) t + V_o t \\ Y = A_{oc} sin(n_{дв} * i_{кп})\, t + V_{oc} t \end{cases} \quad (2.2.16)$$

Розглянемо траєкторію зерна інструмента в прямому і зворотному напрямку коли значення колової подачі змінюється два рази рис. 2.2.5.

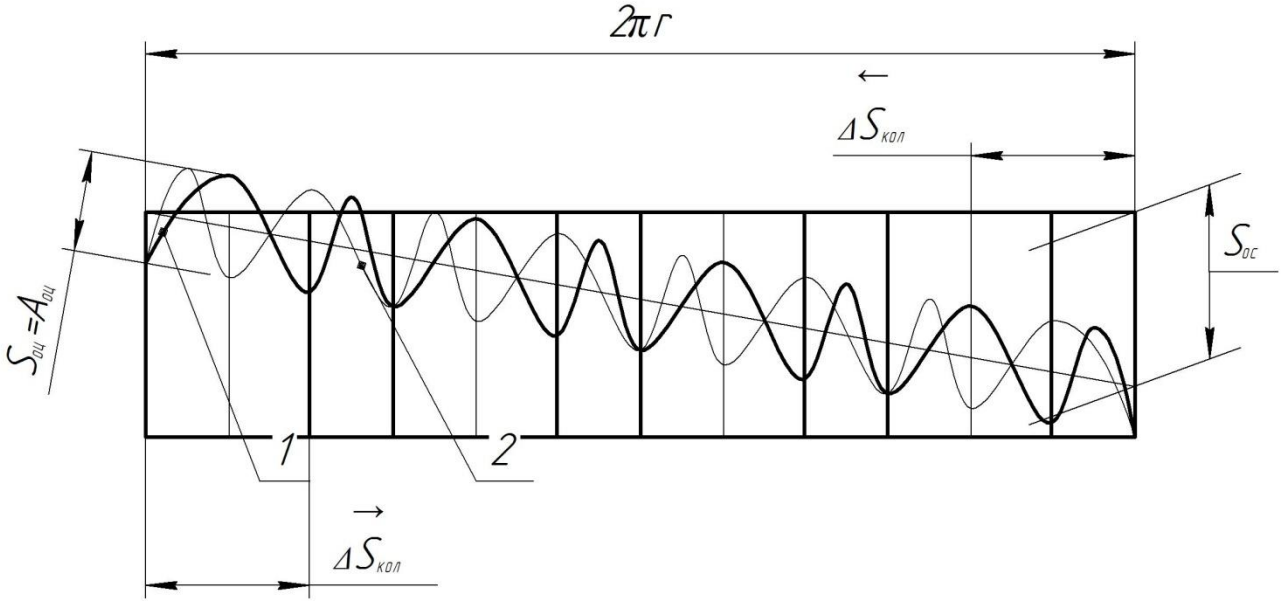


Рис. 2.2.5. Покадрова схема траєкторія руху зерна інструменту в прямому і зворотному напрямку розгорнута на площину зі зміною колової подачі два рази

1 – в прямому напрямку; 2 – зворотному напрямку;

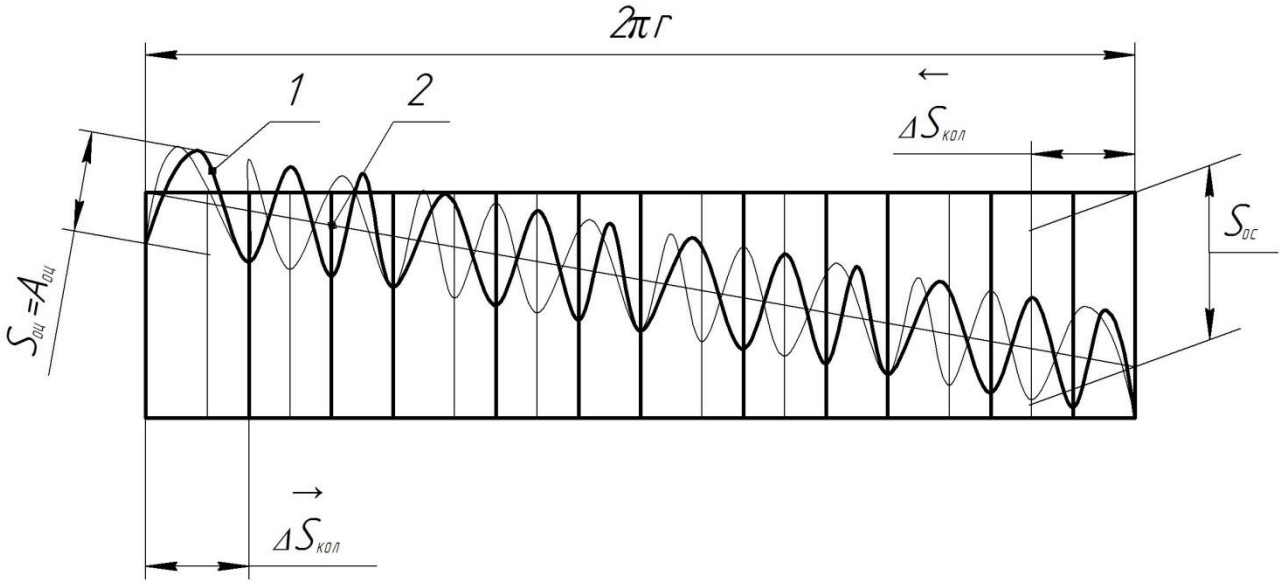


Рис.2.2.6 . Покадрова схема траєкторія руху зерна інструменту в прямому і зворотному напрямку розгорнута на площину зі зміною колової подачі три рази

На рис. 2.2.5 та рис. 2.2.6. можемо спостерігається утворення фігури Ліссажу. Отже, розглянемо схему взаємодій механізмів осциляції в цілому.

Із представленої схеми рис.2.2.7 можемо спостерігати утворення фігур Ліссажу на всій поверхні обробленої деталі.

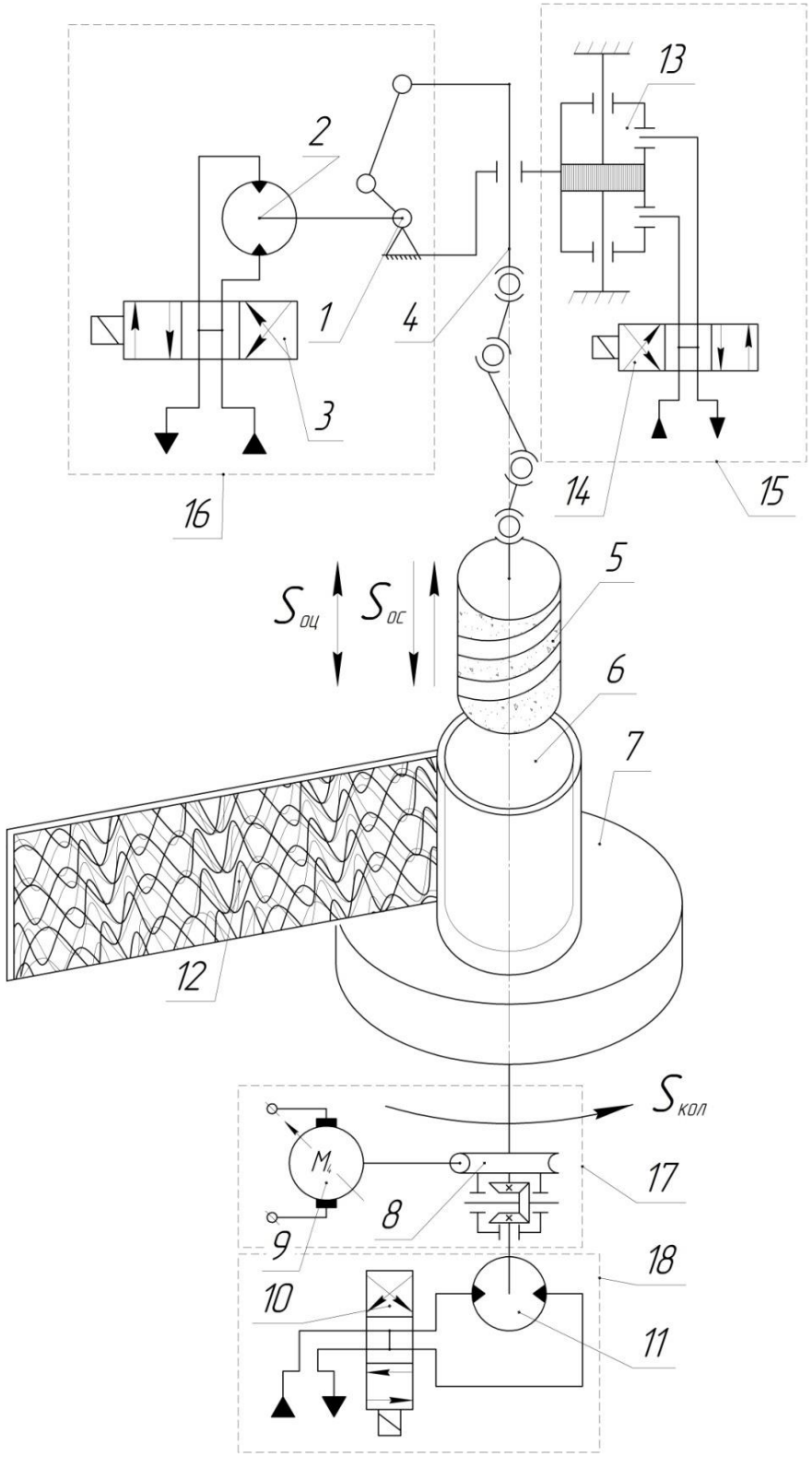


Рис. 2.2.7 Схема взаємодії механізмів на продукційному верстаті.

1- Кривошипно-повзуний мехнізм; 2 - Гідравлічний двигун; 3 - Гідророзподільник; 4 - Шарнірний механізм; 5 – Інструмет; 6 – Деталь; 7 – Стіл; 8 – Диффернціал; 9 - Кроковий електродвигун; 10 – Гідророзподільник; 11 - Гідравлічний двигун; 12 - Траєкторія руху зерна; 13 – гдроциліндр; 14 – гідророзподільник; 15 – механізм осьової подачі; 16 – механізм осьової осцилюючої подачі; 17 – механізм колової осцилюючої подачі; 18 – механізм колової подачі.

2.3 Висновки

Обмеження програмного керування: Традиційні конструктивні схеми систем регулювання радіального розміру (СРРР), що функціонують у режимі програмного керування підналагодженням, не забезпечують високої точності регулювання. Головним фактором зниження точності є значна динамічна інерційність виконавчих механізмів під час протікання перехідних процесів.

Низька швидкодія адаптивних систем: Існуючі алгоритми адаптивного керування підналагодженням у процесі хонінгування характеризуються недостатньою швидкодією. Вони не здатні оперативно та адекватно реагувати на нестаціонарні (змінні) умови різання, що постійно виникають у зоні контакту інструмента із заготовкою.

Фізична природа інерційності: Ключовою причиною виникнення інерційності в механізмах СРРР є нелінійний характер сил тертя. Зокрема, флуктуація (мінливість) сил кінетичного тертя та нестабільність сил статичного тертя (явище застою) виступають основним джерелом похибок при мікропереміщеннях і регулюванні розміру.

Проблема різнорідності середовищ: Функціонування традиційних СРРР ускладнюється тим, що передача та обробка вхідних/вихідних сигналів потребує багаторазового перетворення між різнорідними фізичними середовищами, а саме:

електричним (сигнали керування від ЧПК);

гідравлічним (виконавчі приводи);

механічним (кінематичні ланки переміщення брусків). Така багатоступенева трансформація природи інформаційного та силового сигналів додатково збільшує загальну інерційність і знижує точність верстатної системи.

РОЗДІЛ 3
ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

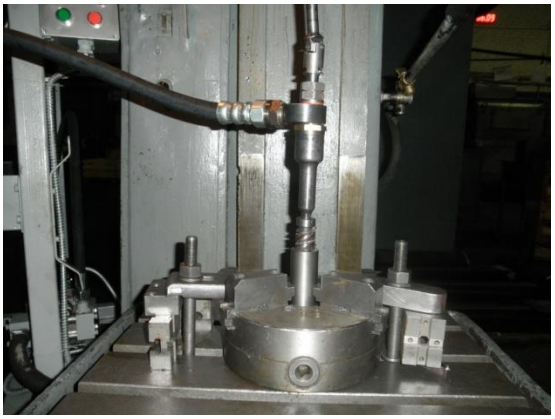
ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.

3.1. Загальні вимоги до проведення експериментальних досліджень.

Для проведення експериментальних досліджень виникає необхідність у застосуванні обладнання, технологічні параметри та режими роботи якого максимально наближені до реальних умов великосерійного виробництва. З огляду на це, як базову експериментальну установку найбільш доцільно використати серійний вертикально-свердлильний верстат моделі 2Н135, який підлягає попередній цільовій модернізації.



а)



б)

Рис.3.1.1. Експериментальна установка діагностування гідростатичної характеристик ПГХ

а) наладка хонінгувальної системи; б) зона обробки;

1 – СРРР на базі ПГХ; 2 – напірна магістраль; 3 – гідронасос; 4 – манометр контролю тиску $\rho_{ГСТ}$; 5 – дросель регулювання $\rho_{ГСТ}$; 6 – оброблювана деталь; 7 – ОФНД; 8 – ПГХ; 9 – товкач взаємодії ОФНД та ПГХ; М– момент зрушення, прийняти для розрахунку контактного тиску $\rho_к$

Експериментальна установка (рис. 3.2.2) складається із системи регулювання радіального розміру (СРРР) 1, гідронасоса 3, манометра 4, регульованого гідродроселя 5, осьового формоутворюючого напруженого деформатора (ОФНД) 7, пружної гідростатичної хонінгувальної головки (ПГХ) 8, штовхача 9 та оброблюваної деталі 6.Гідравлічний насос 3 нагнітає робочу рідину через напірну магістраль 2 у внутрішню порожнину ОФНД 7, де генерується гідростатичний тиск Дія цього тиску створює зусилля, що деформує дно ОФНД 7. Ця деформація спричиняє лінійне переміщення штовхача 9, який, у свою чергу, передає зусилля на ПГХ 8. Унаслідок цього ПГХ 8 деформується (розтискається) в радіальному напрямку, що призводить до виникнення робочого контактного тиску на оброблюваній поверхні деталі 6. Регулювання величини гідростатичного тиску здійснюється за допомогою гідродроселя 5.2.

Принцип дії верстатної установки. За допомогою пристрою числового програмного керування (ЧПК) 1 верстат налаштовується на необхідний автоматичний цикл обробки деталі. Структура та параметри робочого циклу попередньо задаються керуючою програмою відповідно до методики проведення експериментальних досліджень. Технологічний цикл регламентується такими базовими параметрами:

- частота обертання хонінгувальної головки;

- швидкість зворотно-поступального переміщення інструмента (швидкість поздовжньої подачі);величина робочого тиску в порожнині алмазної хонінгувальної головки;

- тривалість початкового етапу циклу (період врізання);тривалість основного робочого етапу циклу (період зняття основного припуску);тривалість завершального етапу циклу (період виходжування).

Безперервний моніторинг та контроль фактичних значень вхідних і вихідних параметрів процесу здійснюється через графічний інтерфейс (дисплей) системи ЧПК. Для ефективного очищення зони різання від продуктів зношування (шламу) та зниження тепло напруженості процесу застосовується штатна верстатна система подачі змащувально-охолоджувальної технологічної рідини (ЗОР) 8.

3.2. Експериментальне дослідження процесу хонінгування.

3.2.1 Дослідження схрещування траєкторії слідів алмазно-абразивних брусків.

У даному підрозділі проведено дослідження впливу кута перехрещування алмазно-абразивних брусків на інтенсивність зняття припуску за умов варіювання швидкості різання. Базові вхідні параметри експерименту наведено в табл. 3.1.

Вхідні дані до досліджування Таблиця 3.1

Найменування параметрів	Одиниця вимірювання	Значення
Матеріал		18ХГТ
Твердість	HRC	60…65
Контактний тиск, Рк	Мпа	0, 5
Кути схрещування, α	град.	30°, 45°, 60°,
Час	хв	3
Довжина оброблюваного отвору	мм	127
Матеріал алмазно-абразивних брусків		АС 16 80/63

Кут сітки алмазно-абразивних брусків визначається за наступним рівнянням:

$$tan\alpha = \frac{V_{fa}+V_{wa}}{V_{ft}} \quad (3.2.2)$$

В результаті дослідження отримуємо наступні значення при куті схрещування траєкторії слідів алмазно-абразивного бруска α=30° табл.3.2, при куті α=45° -табл. 3.3 та куті α=60° - табл. 3.2

За результатами експериментальних досліджень побудовано графічні залежності інтенсивності зняття припуску (видалення матеріалу) від швидкості різання за різних значень кута перехрещування траєкторій мікрослідів алмазно-абразивних брусків. Аналіз отриманих кривих дозволив встановити такі закономірності:

При куті α=30°: Графічна залежність має стабільний характер зростання (до відносного показника 1). Цей режим демонструє найбільш прогнозовану динаміку процесу.

Результати дослідження впливу кута схрещування траєкторії слідів алмазно-абразивних брусків приведені в таблиці 3.2

№	Швидкість різання V_c мм/хв	Об'єм видаляємого матеріалу Q_w мм³/хв
$\alpha = 30°$		
1	0,4	4,5
2	0,6	7
3	0,8	8
4	1	8
$\alpha = 45°$		
5	0,2	3,5
6	0,4	5
7	0,6	5,5
8	0,8	5
9	1	10,5
10	1,15	21
$\alpha = 60°$		
11	0,4	4
12	0,6	6
13	0,8	10

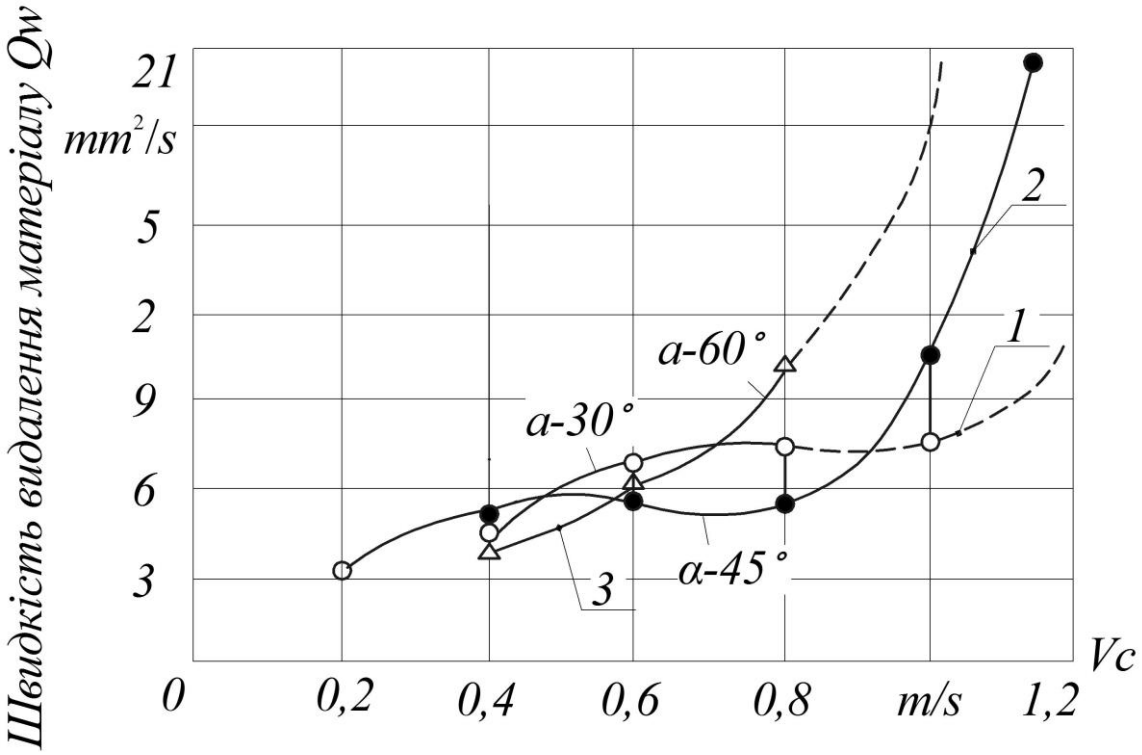


Рис. 3.2.2. Залежність видалення матеріалу від швидкості різання.

При куті α=45°: На початковому етапі спостерігається незначне зростання інтенсивності зняття матеріалу. Сама залежність набуває нелінійного (квазісинусоїдального) характеру з локальним перепадом поблизу значення 0,8. Після проходження цієї точки фіксується різке (стрибкоподібне) інтенсифікування процесу видалення матеріалу.

При куті α=60°: Спостерігається монотонне та рівномірне зростання величини знятого матеріалу в усьому досліджуваному діапазоні швидкостей.

Висновок: На основі аналізу отриманих даних встановлено, що для забезпечення максимальної стабільності та керованості процесу обробки під час хонінгування отворів оптимальним є налаштування кінематики верстата на кут перехрещування траєкторій алмазно-абразивних брусків на рівні α=30°.

3.2.2 Дослідження радіального зносу алмазно-абразивного бруска в залежності від радіальної та осьової швидкості в умовах багатофакторного експерименту.

Наступним етапом роботи стало дослідження інтенсивності радіального зношування алмазно-абразивного бруска залежно від радіальної та осьової швидкостей. Ці випробування проводилися в умовах багатофакторного експерименту, базисом для яких стали оптимальні параметри, отримані за результатами попередньої серії дослідів.

У третій серії експериментів вивчався вплив ключових технологічних факторів на відхилення форми оброблюваного отвору. До переліку досліджуваних змінних увійшли:

коефіцієнт приросту тиску під час переходу від початкового до основного робочого етапу (Vft);

коефіцієнт флуктуації (коливання) тиску на робочому етапі (rh);

коефіцієнт співвідношення тривалості робочого циклу та періоду виходжування.

Експериментальні дослідження здійснювалися з використанням алмазної хонінгувальної головки, оснащеної брусками з характеристикою абразивного шару

АСМ 40/28, 100, М1. Для забезпечення чистоти експерименту як зразки використовували деталі з попередньо обробленими отворами, початкове відхилення від циліндричності яких не перевищувало 4 мкм, а вихідна шорсткість поверхні становила Ra = 0,4...0,8 мкм.

Для комплексної оцінки застосовано метод повного факторного експерименту (ПФЕ). Значення рівнів варіювання досліджуваних факторів наведено в табл. 3.5.

Фізичний зміст уведених коефіцієнтів полягає у відображенні сумісного впливу силових (тиск) і часових параметрів на цільову функцію — геометричну точність отвору за інших рівних умов. Зокрема, використовувався комбінований цикл обробки №3, який відповідає умовам другої серії дослідів із фіксацією константних параметрів (швидкостей V1, V2, Vo та діаметра d).

Розрахунок значень змінних факторів, вплив яких оцінювався в межах даного експерименту, здійснювався за такими залежностями:

$$V_{fa} = l_0\, \pi f Cos(wt) \qquad (3.2.3)$$

де l_0 – довжина; f – переменне введення частоти; ω – уголовая скорость, t – час.

$$v_{ft} = \sqrt{v_{c^2} - l_0\, \pi f Cos(wt)} \qquad (32.4)$$

де v_c – скорость різання; w – частота; l_0 – довжина; ω – уголовая скорость; t – час.

Проведемо дослідження впливу радіального зносу алмазно-абразивного бруска в залежності від радіальної та осьової швидкості табл. 3.5

Вхідні дані до досліджування Таблиця 3.5

Найменування параметрів	Одиниця вимірювання	Значення
Алмазно-абразивний камінь	-	АС16 80/63
Оброблений діаметр	Мм	25
Час	хв	3
Довжина оброблюваного отвору	мм	127
Матеріал делалі		18ХГТ

Параметр оптимізації - радіальний знос алмазно-абразивного бруска.

1. Значення перемінних факторів були прийняті наступні:

Таблиця 3.6

Назва параметрів					
Назва	Позн.	Один.вим-ня	Чисельне значення		
			Нижній рівень	Основний рівень	Верхній рівень
Тиск вхідної ступіні	P_1	МПа	4	7	5
Тиск робочої ступіні максимальний	$P_{2\,max}$		11,8	14,3	18,2
Тиск робочої ступіні мінімальний	$P_{2\,min}$		4	10	10
Час робочої ступіні	t_2	С	317	355,8	390,4
Час вихожування	t_3		244	244	244

2. В якості постійного фактору були прийняті наступні:

Таблиця 3.7

Назва	Позначення	Одиниці вимірювання	Чисельне значення
Час вхідної ступіні	t_1	С	17
Частота зміни тиску	f	Гц	0,2
Тиск циклу вихожування	P_{31}	МПа	11
	P_{32}		6
	P_{33}		5
	P_{34}		2
Натяг в зоні обробки	δ	мкм	0,023-0,033

Контрольований параметр: величина радіального зношування алмазно-абразивного бруска.

Цільове завдання розрахунків: побудова регресійної математичної моделі та оцінювання ступеня впливу змінних факторів на параметр оптимізації. Математичне оброблення експериментальних даних здійснюється відповідно до методології планування експерименту [Пляскін, с. 109–127].

Умови експерименту: матрицю планування та умови проведення дослідів для синтезу математичної моделі другого порядку наведено в табл. 3.8.

Умови проведення досліду для отримання моделі 2-го порядку.

Таблиця 3.8

Рівні вар'ювання	Незалежні зміни		
	Rh	Vfa	Vft
1	90	700	100
2	85	400	100
3	60	300	100
4	50	700	500
5	30	400	500
6	50	300	100
7	30	700	1200
8	30	400	500
9	35	300	100

1. Матриця планування другого порядку.

Таблиця 3.9

№ Дос-ду	Vft	rh	Vfa	Vfa * rh	Vfa * Vft	Vft * rh	Vfa^2	rh^2	Vft^2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
3	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1
4	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
5	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
6	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1
7	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1
8	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1
9	0	0	-1,7	0	0	0	+2,8	0	0
10	0	0	+1,7	0	0	0	+2,8	0	0
11	0	-1,7	0	0	0	0	0	+2,8	0
12	0	+1,7	0	0	0	0	0	+2,8	0
13	-1,7	0	0	0	0	0	0	0	+2,8
14	+1,7	0	0	0	0	0	0	0	+2,8
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Результати третьої серії дослідів

Таблиця 3.10

$\Sigma X^2_i = 2{,}73$ $\Sigma У^2_i = 98{,}4$

№ досліду	Δrh^{-1}	Δrh	Δrh^{-1}-Δrh	$(\Delta rh^{-1}$-$\Delta rh)^2$
1	11	12	13	14
1	5,6	5,5	0,1	0,01
2	7,8	6,9	0,9	0,81
3	5,6	5,5	0,1	0,01
4	7,8	6,9	0,9	0,81
5	4,0	4,01	0,01	0,0001
6	5,6	5,4	0,2	0,04
7	4,0	4,01	0,01	0,0001
8	5,6	5,4	0,2	0,04
9	5,0	4,7	0,3	0,09
10	6,6	7,3	0,7	0,49
11	4,2	4,4	0,2	0,04
12	4,2	4,4	0,2	0,04
13	6,0	6,8	0,8	0,64
14	4,8	4,8	0,4	0,16
15	3,4	3,4	0,14	0,02
16	3,6	3,6	0,06	0,0036
17	3,8	3,8	0,26	0,07
18	3,8	3,8	0,26	0,07
19	3,6	3,6	0,26	0,07
20	3,2	3,2	0,34	0,112

$$\Delta rh = -144.6699 - 0.2265 * V_{ft} + 6.49 * V_{ft^2} + 0.0001 V_{ft} * V_{fa} - 0.0009 V_{fa^2} \quad (3.2.4)$$

З огляду на те, що цільова функція визначена в межах області варіювання факторів, було проведено графічний аналіз поверхні відгуку. Задаючи значення досліджуваних факторів Vft та Vfa у заданих межах їхнього варіювання, обчислено відповідні значення параметра оптимізації (функції відгуку) Y.

Результати розв'язання задачі, отримані за допомогою засобів комп'ютерного моделювання, наведено в табл. 3.11.

Аналіз даних, наведених у таблиці, дає змогу встановити такі закономірності:

- забезпечення максимально можливої точності форми (циліндричності) досягається за значень коефіцієнтів Vfa = 400 та Vft = 500;
- зменшення коефіцієнта Vfa до рівня 300 призводить до ймовірного збільшення величини радіального зношування інструмента;

- подальше збільшення коефіцієнта Vft (понад значення 500) не чинить суттєвого впливу на інтенсивність радіального зношування.

Результати оптимізації параметру радіального зносу бруска

Таблиця 3.11

Параметр оптимізації	Vfa		Vft	
Знос бруска, rh	Кодове значення	Натуральне значення	Кодове значення	Натуральне значення
1	2	3	4	5
15	-0,4…-0,3	1,34…1,37	0,25…0,4	1,62…1,7
16	-0,4…0	1,34…1,44	0…0,4	1,5…1,7
17	-0,4…0,2	1,34…1,46	-0,25…0,4	1,38…1,7
18	-0,4…0,4	1,34…1,48	-0,45…0,4	1,28…1,7
19	-0,4…0,5	1,34…1,5	-0,58…0,4	1,22…1,7
20	-0,4…0,6	1,34…1,52	-0,65…0,4	1,18…1,7
21	-0,4…0,7	1,34…1,54	-0,82…0,4	1,1…1,7
22	-0,4…0,8	1,34…1,56	-0,92…0,4	1,05…1,7
23	-0,4…0,9	1,34…1,58	-1,0…0,4	1,0…1,7
24	0…1,0	1,4…1,6	-1,0…0,4	1,0…1,7

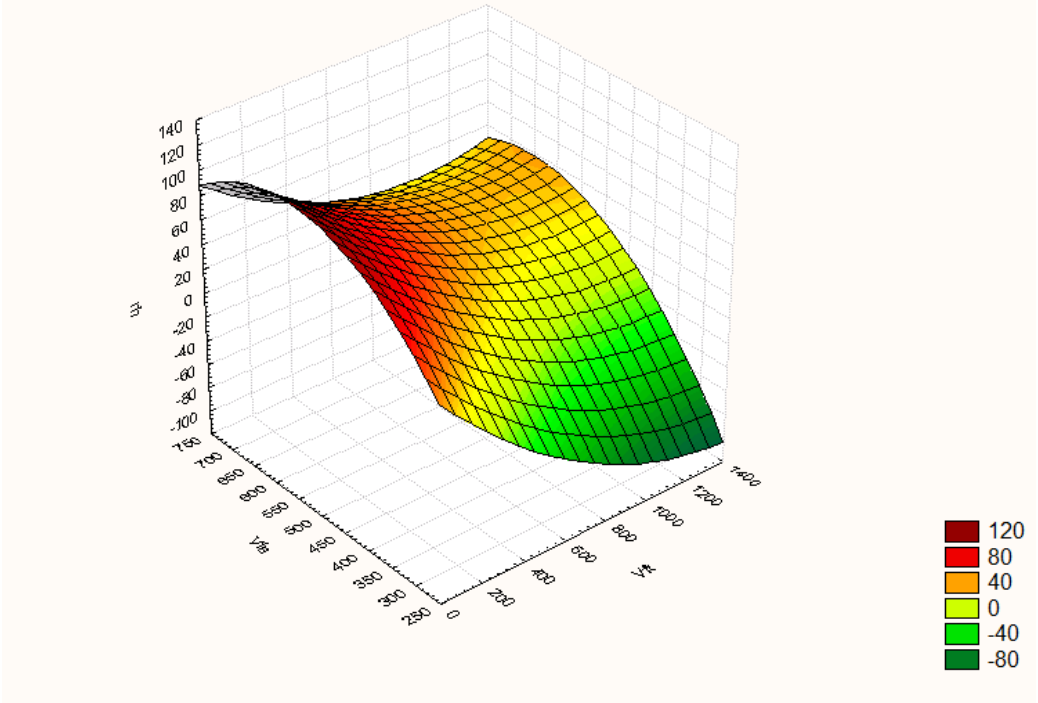


Рис. 3.2.3 Залежність радіального зносу алмазно-абразивного бруска від швидкостей

3.2.3 Дослідження шорсткості поверхні при варіюванні в залежності від швидкості різання в умовах багатофакторного експерименту.

Наступним етапом роботи стало дослідження впливу швидкості різання на шорсткість обробленої поверхні. Ці випробування проводилися в умовах багатофакторного експерименту, базисом для яких стали оптимальні параметри, отримані за результатами попередньої серії дослідів.

У третій серії експериментів вивчався вплив ключових технологічних факторів на відхилення форми оброблюваного отвору. До переліку досліджуваних змінних увійшли:

- коефіцієнт приросту тиску під час переходу від початкового до основного робочого етапу (Vfa);
- коефіцієнт флуктуації (коливання) тиску на робочому етапі;
- коефіцієнт співвідношення тривалості робочого циклу та періоду виходжування.

Експериментальні дослідження здійснювалися з використанням алмазної хонінгувальної головки, оснащеної брусками з характеристикою абразивного шару АСМ 40/28, 100, М1. Для забезпечення чистоти експерименту як зразки використовували деталі з попередньо обробленими отворами, початкове відхилення від циліндричності яких не перевищувало 4 мкм, а вихідна шорсткість поверхні становила Ra = 0,4...0,8 мкм.

Для комплексної оцінки застосовано метод повного факторного експерименту (ПФЕ). Значення рівнів варіювання досліджуваних факторів наведено в табл. 3.14.

Фізичний зміст уведених коефіцієнтів полягає у відображенні сумісного впливу силових (тиск) і часових параметрів на цільову функцію — геометричну точність отвору за інших рівних умов. Зокрема, використовувався комбінований цикл обробки №3, який відповідає умовам другої серії дослідів із фіксацією константних параметрів (швидкостей V1, V2, Vo та діаметра d).

Розрахунок значень змінних факторів, вплив яких оцінювався в межах даного експерименту, здійснювався за такими залежностями:

$$V_{fa} = l_0 \pi f Cos(wt) \qquad (3.2.5)$$

де l_0 – довжина; f – переменне введення частоти;

ω – уголовая скорость, t – час.

$$v_{ft} = \sqrt{v_{c^2} - l_0\, \pi f Cos(wt)} \qquad (3.2.6)$$

де v_c – скорость різання; w – частота; l_0 – довжина;

ω – уголовая скорость; t – час.

Проведемо дослідження впливу радіального зносу алмазно-абразивного бруска в залежності від радіальної та осьової швидкості табл. 3.12

Вхідні дані до досліджування Таблиця 3.12

Найменування параметрів	Одиниця вимірювання	Значення
Алмазно-абразивний камінь	-	АСМ 40/28,100М1
Оброблений діаметр	Мм	25
Час	хв	3
Довжина оброблюваного отвору	мм	127
Матеріал делалі		18ХГТ

Параметр оптимізації – циліндричність отвору.

1. Значення перемінних факторів були прийняті наступні:

Таблиця 3.13

Назва параметрів					
Назва	Позн.	Один.вим-ня	Чисельне значення		
			Нижній рівень	Основний рівень	Верхній рівень
Тиск вхідної ступіні	P_1	МПа	4	7	5
Тиск робочої ступіні максимальний	$P_{2\,max}$		11,8	14,3	18,2
Тиск робочої ступіні мінімальний	$P_{2\,min}$		4	10	10
Час робочої ступіні	t_2	С	317	355,8	390,4
Час вихожування	t_3		244	244	244

2. В якості постійного фактору були прийняті наступні:

Таблиця 3.14

Назва	Позначення	Одиниці вимірювання	Чисельне значення
1	2	3	4
Час вхідної ступіні	t_1	С	17
1	2	3	4
Частота зміни тиску	f	Гц	0,2
Тиск циклу вихожування	P_{31}	МПа	11
	P_{32}		6
	P_{33}		5
	P_{34}		2
Натяг в зоні обробки	δ	мкм	0,023-0,033

- Контрольований параметр: шорсткість оброблюваної поверхні Ra, мкм.

- Цільове завдання розрахунків: побудова рівняння регресії та оцінювання ступеня впливу змінних факторів на параметр оптимізації. Математичне оброблення експериментальних даних здійснюється відповідно до методології планування експерименту [Пляскін, с. 109–127].

Умови проведення досліду для отримання моделі 2-го порядку.

Таблиця 3.15

Рівні вар'ювання	Незалежні зміни		
	Ra	Vfa	Vft
1	2	3	4
1	0.6	700	100
2	1.1	400	0
3	1.5	200	0
4	0.1	700	100
5	0.3	400	250
6	0.2	200	400
7	0.25	700	200
8	0.25	700	600
9	0.4	350	100

2.Матриця планування другого порядку.

Таблиця 3.16

№ Дос-ду	Vfa	Ra	Vft	Vft*Ra	Vft*Vfa	Ra*Vfa	Vft^2_3	Ra^2_2	Vfa^2_1
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
3	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1
4	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
5	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
6	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1
7	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1
8	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1
9	0	0	-1,7	0	0	0	+2,8	0	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0	0	+1,7	0	0	0	+2,8	0	0
11	0	-1,7	0	0	0	0	0	+2,8	0
12	0	+1,7	0	0	0	0	0	+2,8	0
13	-1,7	0	0	0	0	0	0	0	+2,8
14	+1,7	0	0	0	0	0	0	0	+2,8
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Результати третьої серії дослідів

Таблиця 3.17

№ досліду	Ra^{-1}	Ra	Ra^{-1}-Ra	$(Ra^{-1}-Ra)^2$
1	11	12	13	14
1	5,6	5,5	0,1	0,01
2	7,8	6,9	0,9	0,81
3	5,6	5,5	0,1	0,01
4	7,8	6,9	0,9	0,81
5	4,0	4,01	0,01	0,0001
6	5,6	5,4	0,2	0,04
7	4,0	4,01	0,01	0,0001
8	5,6	5,4	0,2	0,04
9	5,0	4,7	0,3	0,09
10	6,6	7,3	0,7	0,49
11	4,2	4,4	0,2	0,04
12	4,2	4,4	0,2	0,04
13	6,0	6,8	0,8	0,64
14	4,8	4,8	0,4	0,16
15	3,4	3,4	0,14	0,02
16	3,6	3,6	0,06	0,0036
17	3,8	3,8	0,26	0,07
18	3,8	3,8	0,26	0,07
19	3,6	3,6	0,26	0,07
20	3,2	3,2	0,34	0,112

$\Sigma X^2_i = 2,73$ $\Sigma У^2_i = 98,4$

$$\Delta rh = -11.3574 - 0.0357 * V_{ft} + 0.0794 * V_{fa} + 0.0001 * V_{ft^2} - 5.8925E - 5V_{ft} * V_{fa} - 7.3128E - 5V_{fa^2} \quad (3.2.7)$$

Враховуючи той факт, що функція існує в границях вар'ювання аргументів, проводимо графічне вивчення поверхні відгуку. Задаємося значеннями факторів К3 і К1 в границях вар'ювання і визначаємо значення У.

Результати рішення задачі, виконаної на ПК приведені в таблиці 3.18

Результати оптимізації параметру шорсткості оброблюваного отвору

Таблиця 3.18

Параметр оптимізації	Vft		Vfa	
Шорсткість, Ra	Кодове значення	Натуральне значення	Кодове значення	Натуральне значення
1	2	3	4	5
15	-0,4…-0,3	1,34…1,37	0,25…0,4	1,62…1,7
16	-0,4…0	1,34…1,44	0…0,4	1,5…1,7
17	-0,4…0,2	1,34…1,46	-0,25…0,4	1,38…1,7
18	-0,4…0,4	1,34…1,48	-0,45…0,4	1,28…1,7
19	-0,4…0,5	1,34…1,5	-0,58…0,4	1,22…1,7
20	-0,4…0,6	1,34…1,52	-0,65…0,4	1,18…1,7
21	-0,4…0,7	1,34…1,54	-0,82…0,4	1,1…1,7
22	-0,4…0,8	1,34…1,56	-0,92…0,4	1,05…1,7
23	-0,4…0,9	1,34…1,58	-1,0…0,4	1,0…1,7
24	0…1,0	1,4…1,6	-1,0…0,4	1,0…1,7

Аналіз даних таблиці показує, що:

забезпечення максимально досяжної циліндричності можливо при значеннях коефіцієнта до Vft = 1000 і коефіцієнта Vfa = 400

при зменшенні коефіцієнта до Vft = 500 можливе збільшення величини радіального зносу.

збільшення коефіцієнта Vfa вище =400 не впливає на величину радіального зносу .

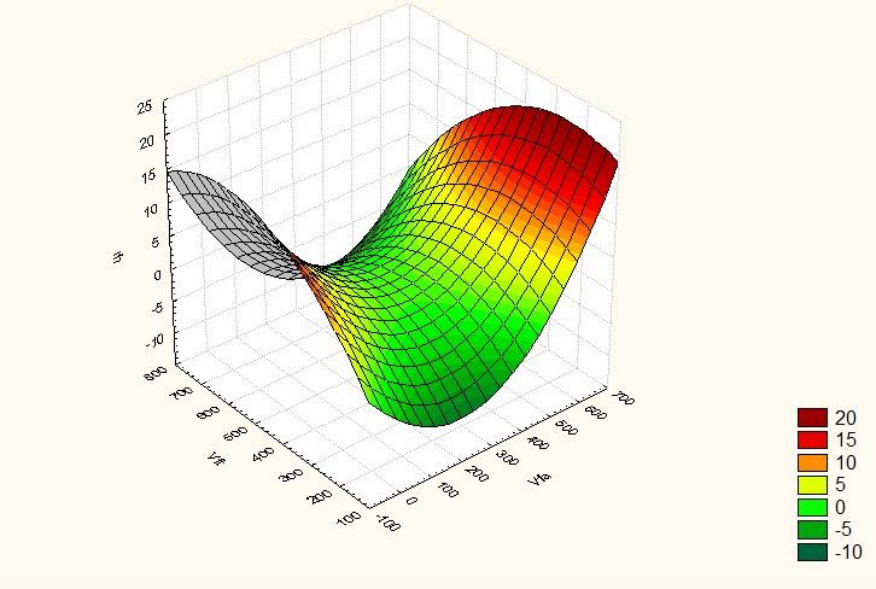


Рис. 3.2.4 Залежність шорсткості поверхні від швидкостей

За результатами дослідження впливу швидкостей різання на якість обробленої поверхні (зокрема, на параметр шорсткості) встановлено, що під час чорнового хонінгування оптимальні значення шорсткості досягаються за середніх значень осьової та тангенціальної швидкостей. Зіставні показники якості поверхні також забезпечуються за умов застосування мінімальних значень зазначених швидкостей.

3.2.4 Дослідження впливу часу обробки на шорсткість поверхні та знос радіального бруска.

На основі аналізу сучасних технологій хонінгування встановлено, що одним із ключових параметрів, який безпосередньо впливає на точність деталі, якість її поверхні та загальні функціональні показники процесу, є тривалість (час) обробки. З огляду на це, виникла необхідність дослідити вплив часу обробки на такі базові технологічні показники:

- шорсткість обробленої поверхні;
- величину радіального зняття припуску металу заготовки;
- інтенсивність радіального зношування алмазно-абразивного шару інструмента.

Графічні результати експериментального дослідження впливу тривалості обробки на шорсткість поверхні та величину радіального зношування бруска наведено на рис. 3.2.5.

Вхідні дані до досліджування Таблиця 3.19

Найменування параметрів	Одиниця вимірювання	Значення
Алмазно-абразивний камінь		АС16 128/100
Контактний тиск, Рк	Мпа	1.0
Оброблений діаметр	мм	25
Час	хв	3,12
Довжина оброблюваного отвору	мм	127
Матеріал деталі		18ХГТ

Результати дослідження 1кривої представлені в табл.3.20

Табл.3.20.

№ досліду	t,сек	Ra,мкм
1	0	16
2	10	12
3	20	8
4	25	6
5	30	5
6	60	3
7	120	2
8	180	2
9	240	2

Результати дослідження 2 кривої представлені в табл.3.21

Табл.3.21

№ досліду	t,сек	Rw,мкм
1	0	10
2	10	20
3	20	35
4	30	40
5	60	55
6	70	60
7	120	70
8	180	75
9	240	75

Результати дослідження 3 кривої представлені в табл.4.22

Табл.2.22

№ досліду	t,сек	Rh,мкм
1	20	10
2	30	12
3	60	17
4	120	25
5	180	28
6	240	29

Отримані результати досліджень подано у вигляді узагальненого графіка, що дає змогу здійснити порівняльний аналіз зміни досліджуваних параметрів залежно від тривалості обробки.

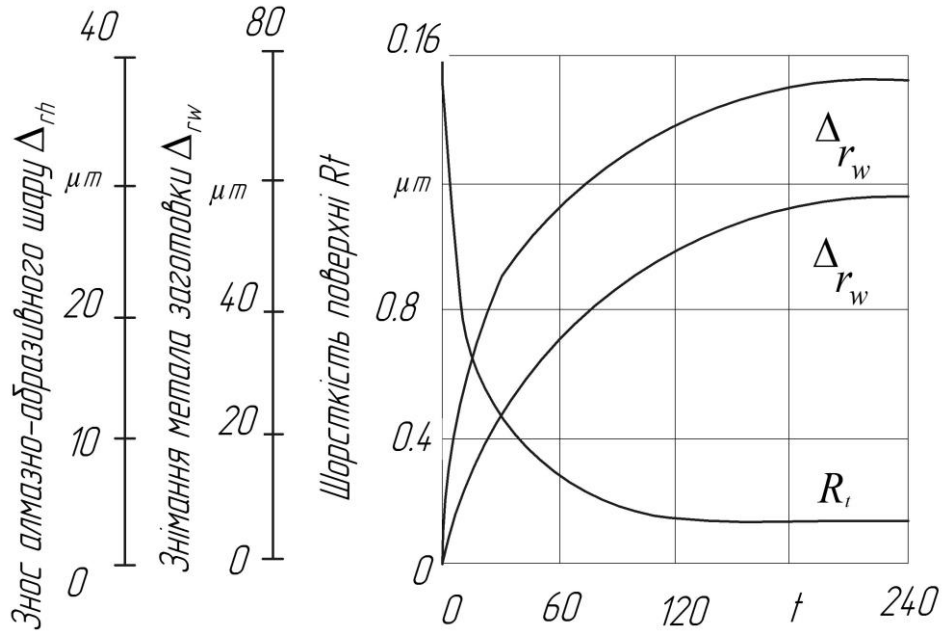


Рис . 3.2.5 Вплив часу обробки на шорсткість поверхні, знімання метала заготовки на радіус напрямку та спрацювання алмазно-абразивного шару в радіальному напрямку інструмента.

1- крива залежність шорсткості поверхні від часу обробки. 2-крива знімання метала заготовки на радіус напрямку в заленості від часу обробки. 3-крива спрацювання алмазно-абразивного шару в радіальному напрямку інструмента в залежності від часу обробки.

Графічна залежність 1 ілюструє вплив тривалості обробки на параметр шорсткості поверхні. Аналіз кривої свідчить, що на початковому етапі процесу значення шорсткості залишається практично незмінним. Зі збільшенням часу обробки спостерігається інтенсивна зміна цього показника до досягнення певного

усталеного рівня, після чого він стабілізується. Зазначена закономірність апроксимується такою математичною моделлю:

$$Rt = 9.4069 - 0.0418 * t$$

Графічна залежність 2 ілюструє вплив тривалості обробки на величину радіального зняття припуску (металу заготовки). Встановлено, що на початковому етапі обробки цей показник інтенсивно зростає. Зі збільшенням часу процесу величина знятого шару металу продовжує змінюватися до досягнення певного граничного рівня, після чого стабілізується (залишається незмінною).

$$\Delta rw = 28.5539 + 0.2507 * t$$

Графічна залежність 3 ілюструє вплив тривалості обробки на величину радіального зношування алмазно-абразивного шару інструмента. Аналіз отриманих даних свідчить, що процес зношування абразивного інструмента відбувається значно плавніше (крива має більш пологий характер) порівняно з динамікою радіального зняття припуску металу заготовки.

$$\Delta rh = 10.4942 + 0.0893 * t$$

За результатами проведених досліджень встановлено оптимальні значення параметрів К1 = 1,75 та К2 = 1,4, за яких геометричне відхилення форми обробленого отвору від циліндричності (рис. 4.13) набуває мінімального значення.

Побудовано графічну залежність (діаграму), яка дає змогу прогнозувати максимально досяжну точність обробки на основі заданих значень параметрів К1 та К3.

Експериментально підтверджено, що оптимальним є триступеневий цикл обробки, який супроводжується коливанням тиску на робочому етапі.

В умовах серійного виробництва доцільно застосовувати триступеневий цикл хонінгування. Кожен із трьох робочих етапів повинен характеризуватися диференційованим (відмінним від інших) значенням тиску, причому на середньому робочому етапі необхідно забезпечити його динамічне коливання з урахуванням параметрів К1 = 1,75 та К2 = 1,4.

Технологічний процес обробки загалом рекомендується здійснювати за встановлених оптимальних значень параметрів: К1 = 1,75 та К2 = 1,4.

РОЗДІЛ 4
ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РОЗРОБКИ ХОНІНГУВАЛЬНОЇ ГОЛОВКИ

5.1. Загальні вихідні дані

Для вирішення питання про економічну ефективність нової конструкції необхідно вибрати «базу для порівняння», яку приймають за основу для виявлення техніко-економічних переваг нового конструкторського рішення та визначення економічного ефекту від його впровадження у виробництво.

Розроблена у даному дипломному проекті конструкція хонінгувальної головки не має вітчизняних аналогів. Тому у якості бази для порівняння приймемо її зарубіжний аналог, який коштує близько 2000 € і потребує застосування дорогого хонінгувального обладнання (вартістю 500 тис. €). Запропонована конструкція шпинделя вертикально-свердлильного верстата мод. 2Н135 дозволить не лише запобігти значних витрати на придбання інструменту та обладнання, а й істотно підвищити продуктивність обробки.

Розрахуємо річну потребу у хонінгувальних головках за формулою [2]:

$$k_i = \frac{N_д \cdot T_{нор} \cdot \gamma \cdot \kappa_{вт}}{t_e}, \qquad (5.1)$$

$N_д$ – річна програма виготовлення деталі, шт./рік;

$T_{нор}$ – штучний час обробки деталі на операції хонінгування, хв.;

γ – питоме значення машинного часу в загальному його варіанті;

$\kappa_{вт}$ – коефіцієнт випадкової втрати інструменту;

t_e – економічна стійкість інструменту, хв.

Потреба у хонінгувальних головках:

- в базовому варіанті

$$\kappa_i = \frac{3600 \cdot 10,0 \cdot 0,6 \cdot 1,1}{37680} = 1 \text{ шт.}$$

- очевидно, що, при значно меншій нормі часу, в проектному варіанті для виконання річної програми обробки деталі також потрібна одна хонінгувальна головка.

Потребу в обладнанні (верстаті 2Н135) визначаємо за формулою [1]:

$$Q_p = \frac{N_д \cdot T_{нор}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot к_в}, \qquad (5.2)$$

де $F_{дрм}$ – дійсний річний фонд часу роботи обладнання, год.;

$к_в$ – коефіцієнт виконання норм (за даними підприємства).

$$Q_p = \frac{3600 \cdot 10,0}{3950 \cdot 60 \cdot 1,01} = 0,15$$

Приймаємо 1 верстат як у базовому, так і в проектному варіантах.

Загальні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів зведено до табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники

№ з/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			базовий	проектний
1.	Програма виробництва деталей	шт./рік	3600	3600
2.	Потреба в обладнанні	шт./рік	1	1
3.	Потреба в інструменті	шт./рік	1	1
4.	Штучний час обробки деталі	хв.	10,0	3,14
5.	Площа, яку займає верстат	$м^2$	2,23	2,23
6.	Встановлена потужність електродвигунів	кВт	1,7	1,7
7.	Категорія ремонтної складності: механічної/електричної частин	УРО	14/9	14/9
8.	Розряд роботи верстатника	розряд	3	3
9.	Оптова ціна: - верстата - хонінгувальної головки	 грн. грн.	 75100 100000	 - -

5.2. Визначення витрат на підготовку виробництва

5.2.1. Конструкторська підготовка виробництва

Визначення витрат на конструкторську підготовку виробництва шпинделя та хонінгувальної головки виконаємо у такій послідовності:

1. Встановлюємо етапи конструкторської підготовки виробництва інструменту та модернізації верстата: технічне завдання; технічна пропозиція; ескізний проект; технічний проект; робочий проект.

2. Встановлюємо групу новизни та складності модернізації верстата згідно [1, табл. А.1 і А.2 дод. А].

3. Визначаємо кількість деталей, які підлягають розробці, диференціюючи їх за видами. За допомогою коефіцієнтів переводу [1, табл. А.3 дод. А] деталі різних видів переводимо в «умовні деталі».

4. Трудомісткість технічного і робочого проектів визначаємо як добуток відповідної загальної кількості «умовних деталей» на трудомісткість однієї умовної деталі [1, табл. А.4 дод. А] в залежності від групи новизни та складності модернізації верстата.

5. Трудомісткість технічного завдання, технічної пропозиції, ескізного проекту визначаємо відповідно групі новизни і складності верстата [1, табл. А.4 дод. А].

6. Після визначення трудомісткості робіт розраховуємо витрати на конструкторську підготовку виробництва. При цьому, розмір середньогодинної заробітної плати конструктора, використаної нами у розрахунках, відповідає середній заробітній платі цієї категорії працівників у 2018 році. Розмір відсотків приймається за заводською калькуляцією визначення собівартості базових конструкцій.

7. Усі отримані результати зводимо до табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Розрахунок витрат на конструкторську підготовку модернізації верстата

№ п/п	Показники та етапи робіт	Одиниця	Технічне завдання	Технічна пропозиція	Ескізний проект	Технічний проект	Робочий проект	Всього
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Група новизни	гр.	II	-	-	-	-	II
2.	Група складності	гр.	II	-	-	-	-	II
3.	Кількість деталей × коефіцієнт переводу в «умовні деталі»:	шт.	-	-	-	-	-	-
	б) литих та зварних, які не є корпусними	-	-	-	-	11×2	11×4	
	в) оригінальних, які не є литими та корпусними	-	-	-	-	61×1	61×1	-
	г) стандартних нормалізованих	-	-	-	-	72×0,15	72×0,15	-
	д) покупних деталей та виробів	-	-	-	-	26×0,15	26×0,15	-
4.	Кількість умовних деталей	шт.	-	-	-	106,8	119,7	-
5.	Норма на умовну деталь	нор-год.	-	-	-	2,0	2,6	-
6.	Трудомісткість етапу робіт	нор-год.	24	20	31,5	213,6	311,22	600,32
7.	Середньогодинна заробітна плата конструктора	грн./год.	113,25	102,66	97,54	98,79	90,86	
8.	Зарплата основна ($З_о$)	грн.	2718,00	2053,2	3072,5	21101,5	28277,5	57222,70
9.	Зарплата додаткова ($З_д$): 10% від $З_о$	грн.	271,80	205,32	307,25	2110,15	2827,74	5722,27
10.	Єдиний соціальний внесок: 22,0% від ($З_о$+$З_д$)	грн.	657,76	496,87	743,55	5106,57	6843,14	13847,89
11.	Витрати на відрядження: 5% від $З_о$	грн.	135,90	102,66	153,63	1055,08	1413,87	2861,14
12.	Накладні витати: 45% від $З_о$	грн.	1223,10	923,94	1382,6	9495,69	12724,9	25750,22
13.	Всього вартість проекту $В_{пк}$	грн.	5006,56	3782,0	5659,6	38869,0	52087,1	105404,0

5.2.2. Технологічна підготовка виробництва

Розрахунок витрат на технологічну підготовку виробництва здійснюємо відповідно до вимог «Єдиної системи технологічної підготовки виробництва». На основі проведеного аналізу технологічності конструкцій хонінгувальної головки та шпинделя визначено перелік тих етапів, які слід включити до технологічної підготовки модернізації верстата:

– технологічний контроль креслень, їх налагодження та розмноження;

– розробка техпроцесів: виготовлення деталей та складання вузлів;

– інші витрати.

Трудомісткість технологічної підготовки виробництва визначаємо в такій послідовності.

1. В залежності від кількості деталей і вузлів різної технологічної складності та на підставі диференційованих норм часу визначаємо трудомісткість проектування технологічних процесів виготовлення деталей і складання вузлів. Трудомісткість інших етапів робіт технологічної підготовки виробництва визначаємо у відсотках від трудомісткості проектування технологічних процесів обробки деталей та складання вузлів.

2. Після визначення трудомісткості виконання етапів робіт з технологічної підготовки виробництва визначаємо вартість технологічної підготовки виробництва інструменту та модернізації верстату $B_{\text{пт}}$. (табл. 5.3).

Таблиця 5.3

Витрати на технологічну підготовку

№ п/п	Показники та етапи робіт	Кількість	Кількість нормо-годин на одиницю	Загальна кількість нормо годин	Середньогодинна зарплата технолога	Зарплата основна $З_о$, грн.	Додаткова зарплата $З_д$, 10% від $З_о$, грн.	Відрахування у соціальні фонди 22,0% від ($З_о$+$З_д$)	Накладні витрати 55% від $З_о$, грн.	Загальна вартість
1	Технологічний контроль креслень, їх відладка та розмноження, н-год.			17,5	105,64	1848,70	184,87	447,39	1016,79	3497,74
2	Розробка техпроцесів виготовлення деталей:									
	а) загальна кількість деталей, шт.	72		713		67980,75	6798,08	16451,34	37389,4	128619,6
	б) у т.ч. за групами технологічної складності:									
	I	22	4,5	99	83,93	8309,07				
	II	32	9	288	83,93	24171,84				
	III	16	17	272	106,23	28894,56				
	IV	2	27	54	122,32	6605,28				
3	Розробка технологічного процесу складання вузлів, шт., у т.ч.	2		17,6		1741,35	174,13	421,41	957,74	3294,62
	інструмент (I гр. складності	1	2,7	2,7	83,93	226,61				
	шпиндель (IV гр. складності	1	14,9	14,9	101,66	1514,73				
4	Інші витати, н-год.			16,8	83,93	1410,02	141,00	341,23	775,51	2667,77
5	Всього вартість ТПП, грн.			764,9		72980,82	7298,08	17661,36	40139,5	138080,0

5.3. Визначення витрат на виготовлення хонінгувальної головки та модернізації верстата

Трудомісткість виготовлення хонінгувальної головки та шпинделя (модернізації верстата) $T_{\text{о}}$ визначаємо в нормо-годинах за формулою:

$$T_o = \sum_{i=1}^{n} T_i \,, \tag{5.3}$$

де n – кількість i-тих видів робіт;

$T_к$, $T_м$, $T_т$, $T_с$, $T_{ін}$, – трудомісткість ковальсько-штампувальних, механічних, термічних, слюсарсько-складальних, та інших робіт, норо-год.

Після визначення трудомісткості виготовлення проектного інструмента та модернізації верстата розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$З_{\text{ор}} = \sum_{i=1}^{n} C_{\text{г(і)}} \cdot T_{\text{і}} \tag{5.4}$$

де n – кількість i-тих видів робіт;

$C_{\text{г(і)}}$ – середньогодинна тарифна ставка робітників, які виконують i-й вид робіт з урахуванням умов праці, грн./год.;

$T_{\text{і}}$ - трудомісткість i-того виду робіт, нормо-год.

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах з виготовлення хонінгувальної головки:

$$З_{\text{ор}} = 18,6 \cdot 92,015 = 1711,48 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_{\text{о}} = \sum_{i=1}^{n} З_{\text{ор(і)}} \cdot \frac{П_{\text{во(і)}}}{100} \,, \tag{5.5}$$

де $П_{\text{во(і)}}$ - процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по i-му виду робіт за заводською калькуляцією.

Так, на механічних роботах:

$$B_{\text{о}} = 1711,48 \cdot \frac{280}{100} = 4792,14 \text{ грн.}$$

в) цехові витрати:

$$B_{\text{цех}} = \sum_{i=1}^{n} З_{\text{ор(i)}} \cdot \frac{П_{\text{цех(i)}}}{100}, \qquad (5.6)$$

де $П_{\text{цех(i)}}$ – процент цехових витрат по кожному *i*-му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

$$B_{\text{цех}} = 1711,48 \cdot \frac{232}{100} = 3970,63 \text{ грн.}$$

Результати аналогічно виконаних розрахунків даних статей на інших роботах заносимо до табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Трудомісткість виготовлення та окремі види витрат, включені до собівартості хонінгувальної головки та модернізації верстата

Види робіт	Трудомісткість робіт, нормо-год.	Середній розряд	Середньо-годинна тарифна ставка робітників, грн./год.	Основна заробітна плата робітників $З_{\text{ор}}$, грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, $В_{\text{о}}$,		Цехові витрати $К_{\text{цех}}$	
					%	грн.	%	грн.
Хонінгувальна головка								
Ковальсько-штампувальні	2,1	3	92,754	194,78	310	603,83	223	434,37
Механічні	18,6	4	92,015	1711,48	280	4792,14	232	3970,63
Термічні	2,5	3	102,716	256,79	285	731,85	250	641,98
Слюсарсько-складальні	1,9	4	92,015	174,83	210	367,14	142	248,26
Інші	1,8	3	82,810	149,06	220	327,93	140	208,68
Всього	26,9	-	-	2486,94	-	6822,89	-	5503,91
Шпиндель								
Ковальсько-штампувальні	12,6	3	92,754	1168,70	310	3622,97	223	2606,20
Механічні	95,3	4	92,015	8769,03	280	24553,28	232	20344,15
Термічні	2,5	3	102,716	256,79	285	731,85	250	641,98
Слюсарсько-складальні	10,1	4	92,015	929,35	210	1951,64	142	1319,68
Інші	1,3	3	82,810	107,65	220	236,84	140	150,71
Всього	121,8	-	-	11231,52	-	31096,58	-	25062,72

Собівартість виготовлення інструменту та модернізації верстата розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на підприємстві кошторисних і звітних калькуляцій.

Розрахунок виконуємо за формулою:

$$C_{вир} = M_о + M_д + П_н + T_в - B_{зв} + E_{тех} + П_{тех} + \\ + З_{ор} + З_{др} + B_{єс} + B_{цп} + B_{цех} + B_{зав} + B_{ін}, \quad (5.7)$$

де: $M_о$, $M_д$ – відповідно витрати на основні та допоміжні матеріали, грн.;

$П_н$ – покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби, грн.;

Розрахунки $M_о$, $П_н$, зводимо до табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Склад матеріальних витрат

№ з/п	Матеріали, покупні комплектуючі вироби	Одиниця	Витрати (шт., кг)	Ціна, грн.	Витрати на виріб, грн.
Інструмент					
Основні матеріали					
1.	Сталь У8А	кг	1,2	143,8	172,56
Покупні напівфабрикати					
1.	Підшипники	шт.	2	357,6	715,20
2.	Метизи	компл.	1	58,26	58,26
Всього		–	–	–	773,46
Шпиндель					
Основні матеріали					
1.	Сталь 40Х	кг	17,8	47,7	849,06
Покупні напівфабрикати					
1.	Підшипники	шт.	4	357,6	1430,40
2.	Метизи	кг	8,5	45,36	385,56
3.	Інші покупні				213,60
Всього		–	–	–	2029,56

$B_т$ – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

$B_{зв}$ – зворотні відходи, які реалізуються (віднімаються), грн.;

$E_{тех}$, $П_{тех}$ – енергія та паливо на технологічні цілі, грн.;

$З_{др}$ – допоміжна заробітна плата виробничих робітників, грн.;

$B_{єс}$ – єдиний соціальний внесок, грн.;

$B_{цп}$ – відшкодування зносу інструмента та пристосувань цільового призначення, грн.;

$B_{зав}$, $B_{ін}$ – загальнозаводські та інші виробничі витрати, грн.;

$K_{пв}$ – позавиробничі витрати, грн.

Розрахунок собівартості зводимо до табл. 5.6.

Таблиця 5.6

Витрати на виготовлення хонінгувальної головки та модернізацію верстата

№ з/п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Величина, грн.	
				інструмент	шпиндель
1.	Матеріали основні	$M_о$	табл. 5.5	172,56	849,06
2.	Матеріали допоміжні	$M_д$	4% від $M_о$	6,90	33,96
3.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств	$П_н$	табл. 5.5	773,46	2029,56
4.	Зворотні відходи	$– B_{зв}$	6% від $M_о$	10,35	50,94
5.	Транспортно-заготівельні витрати	$B_т$	5% від ($M_о$ + $M_д$+ $П_н$)	38,12	116,50
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$П_{тех}$, $E_{тех}$	70,8% від $M_о$	1760,75	7951,92
7.	Всього матеріальні витрати			2741,44	10930,06
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. 5.4	2486,94	11231,52
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	248,69	1123,15
10.	Єдиний соціальний внесок	$B_{сс}$	22,0% від ($З_{ор}$+$З_{др}$)	601,84	2718,03
11.	Відшкодування зносу інструментів та пристосувань цільового призначення	$B_{цп}$	12,2% від $З_{ор}$	303,41	1370,25
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	$B_о$	табл. 5.4	6822,89	31096,58
13.	Цехові витрати	$B_{цех}$	табл. 5.4	5503,91	25062,72
14.	Загальнозаводські витрати	$B_{зав}$	221% від $З_{ор}$	5496,13	24821,67
15.	Інші виробничі витрати	$B_{ін}$	3,4% від $З_{ор}$	84,56	381,87
16.	Виробнича собівартість	$C_{вир}$	Σст.1-15	24290,0	108736,0

5.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)

Розрахунок експлуатаційних витрат виконуємо за формулою [1]:

$$B_{\text{е}} = \sum_{i=1}^{m} B_{\text{і}} \qquad (5.8)$$

де $B_{\text{мо}}$ – витрати на основні матеріали (залишаються незмінними в порівнюваних варіантах), грн.;

$B_{\text{з}}$ – витрати на заробітну плату основну, додаткову з відрахуваннями на соціальні потреби основних робітників, грн.;

$B_{\text{е}}$ – витрати на силову електроенергію, грн.;

$B_{\text{мд}}$ – витрати на допоміжні матеріали. грн.;

$B_{\text{р}}$ – витрати на ремонт обладнання, грн.;

$B_{\text{п}}$ – витрати на утримання приміщення, грн.;

$B_{\text{а}}$ – витрати на амортизацію обладнання, грн.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову з відрахуваннями на соціальні потреби (єдиний соціальний внесок):

$$B_{\text{з}} = C_{\text{г}} \frac{T_{шт}}{60} \cdot \left(1 + K_{\text{д}}\right) \cdot \left(1 + K_{\text{с}}\right) \qquad (5.9)$$

де $C_{\text{г}}$ - годинна тарифна ставка оператора, грн./год.;

$T_{\text{шт}}$ – час обробки деталі, хв.;

$K_{\text{д}}$, $K_{\text{с}}$ – відповідно коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань на соціальні потреби.

У базовому варіанті:

$$B_{з}^{баз} = 82,810 \cdot \frac{10,0}{60} \cdot \left(1 + 0,1\right) \cdot \left(1 + 0,22\right) = 20,7991 \text{ грн.}$$

В проектному варіанті:

$$B_{з}^{пр} = 82,810 \cdot \frac{3,14}{60} \cdot \left(1 + 0,1\right) \cdot \left(1 + 0,22\right) = 6,5309 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$B_{\text{е}} = \frac{N_{\text{в}} \cdot K_{\text{о}} \cdot K_{\text{N}} \cdot K_{\text{д}}}{\eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{с}}} \cdot \frac{T_{\text{шт}}}{60} \cdot Ц_{\text{ел}} \qquad (5.10)$$

де $N_{\text{в}}$ – встановлена потужність електродвигунів верстата, кВт;

$K_{\text{о}}$ – коефіцієнт одночасної роботи моторів (приймають 0,65...0,8);

K_{N} – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (приймають 0,65…0,8);

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом (приймають 0,5…0,6 для свердлильних верстатів);

$\eta_{\text{с}}$ – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів;

$\eta_{\text{м}}$ – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства;

$Ц_{\text{ел}}$ – ціна 1 кВт-год силової електроенергії, грн.

$$B_{\text{ел}}^{\text{баз}} = \frac{4,5 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,5}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{10,0}{60} \cdot 18,1 = 3,1830 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{ел}}^{пр} = \frac{4,5 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,5}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{3,14}{60} \cdot 18,1 = 0,9994 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{дм}} = \frac{M_{\text{гв}} \cdot R_{\text{м}} \cdot T_{\text{шт}}}{60 \cdot 100} \cdot K_{\text{п}} \qquad (5.11)$$

де $M_{\text{гв}}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали на 1 УРО механічної частини всіх типів верстатів, коп.;

$R_{\text{м}}$ – категорія складності ремонту механічної частини верстата, УРО;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для серійного $K_{\text{п}} = 1$).

$$B_{\text{дм}}^{\text{баз}} = \frac{79,5 \cdot 14 \cdot 10,0}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 1,8550 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{дм}}^{пр} = \frac{79,5 \cdot 14 \cdot 3,14}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,5824 \text{ грн.},$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_{\text{р}} = \frac{R_{\text{м}} \cdot Г_{\text{вм}} + R_{\text{е}} \cdot Г_{\text{ве}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \qquad (5.12)$$

де $Г_{\text{вм}}$, $Г_{\text{ве}}$ – відповідні річні витрати на всі види ремонту на 1 УРО механічної та електричної частин верстата, грн./рік;

$F_{\text{дрм}}$ – дійсний річний фонд часу роботи верстата (при двозмінному режимі роботи для серійного виробництва – 3950 год.).

$$B_p^{баз} = \frac{(14 \cdot 980 + 9 \cdot 790) \cdot 10,0}{3950 \cdot 60} = 0,8789 \text{ грн.};$$

$$B_p^{пр} = \frac{(14 \cdot 980 + 9 \cdot 790) \cdot 3,14}{3950 \cdot 60} = 0,2760$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{уп}} = \frac{F_{\text{о}} \cdot K_{\text{д}} \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60} \qquad (5.13)$$

де $F_{\text{о}}$ – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, м^2;

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення):

C – річні витрати, пов'язані з використанням 1 м^2 виробничого приміщення, грн./м^2;

$F_{\text{дрм}}$ - дійсний річний фонд часу роботи обладнання, год.

$$B_{\text{уп}}^{\text{баз}} = \frac{1,7 \cdot 4,0 \cdot 10,0}{3950 \cdot 60} \cdot 780 = 3,2145 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{уп}}^{пр} = \frac{1,7 \cdot 4,0 \cdot 3,14}{3950 \cdot 60} \cdot 780 = 1,0093 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію верстата:

$$B_{\text{а}} = \frac{Ф_{\text{бал}} \cdot Н_{\text{а}}}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot \frac{Т_{\text{нор}}}{60} \qquad (5.14)$$

де $Н_{\text{а}}$ – норма амортизації, %;

$Ф_{\text{бал}}$ – балансова вартість верстата, грн.

Балансова вартість базового верстата:

$$Ф_{\text{бал}} = Ц_{\text{опт}} \cdot \left(1 + К_{\text{тр}} + К_{\text{м}} + К_{\Ф}\right) \qquad (5.15)$$

де $Ц_{\text{опт}}$ – оптова ціна верстата, грн.;

$К_{\text{тр}}$, $К_{\text{м}}$, $К_{\Ф}$ – відповідно коефіцієнти, які враховують транспортування (0,05...0,1), монтаж (0,04...0,06) та влаштування фундаменту (0,02...0,08).

$$Ф_{\text{бал}}^{\text{баз}} = 75100 \cdot \left(1 + 0,08 + 0,06 + 0,05\right) = 89369 \text{ грн.},$$

Балансову вартість модернізованого верстата визначимо за формулою:

$$Ф_{бал}^{пр} = Ф_{зал}^{баз} - В_{ан} + С_{мод}, \qquad (5.16)$$

де $Ф_{зал}^{баз}$ - залишкова вартість базового верстата на момент модернізації, грн.:

$$Ф_{зал}^{баз} = Ф_{бал}^{баз} - \frac{Ф_{бал}^{баз} \cdot Н_{а} \cdot Т_{ек}}{100}, \qquad (5.17)$$

де $Т_{ек}$ - строк експлуатації верстата до моменту модернізації, років.

$$Ф_{зал}^{\text{баз}} = 89369 - \frac{89369 \cdot 20 \cdot 3}{100} = 35748 \text{ грн.},$$

$$Ф_{зал}^{пр} = 35748 - 3597 + 108736 = 140887 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{а}}^{\text{баз}} = \frac{89369 \cdot 20 \cdot 10,0}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 0,7542 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{а}}^{\text{баз}} = \frac{140887 \cdot 20 \cdot 3,14}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 0,3733 \text{ грн.},$$

Результати розрахунків зводимо до таблиці 5.7.

Таблиця 5.7.

Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

№ п.п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Заробітна плата робітника основна, додаткова з відрахуваннями у соціальні фонди	$B_з$	20,7991	6,5309
2.	Силова електроенергія	$B_{ел}$	3,1830	0,9994
3.	Допоміжні матеріали	$B_{дм}$	1,8550	0,5824
4.	Ремонт обладнання	$B_р$	0,8789	0,2760
5.	Утримання приміщення	$B_{уп}$	3,2145	1,0093
6.	Амортизація обладнання	$B_а$	0,7542	0,3733
7.	Загальна сума	$B_е$	30,6847	9,7713

5.5. Розрахунок показників економічної ефективності проекту

5.5.1. Річний економічний ефект, який отримує підприємство від проектування, виготовлення та експлуатації хонінгувальної головки, а також модернізації вертикально-свердлильного верстата [1]:

$$E_р = (B_e^б - B_e^п) \cdot N_д - E_н \cdot K_д, \qquad (5.18)$$

де: $B_e^б, B_e^п$ - відповідно річні експлуатаційні витрати у базовому та проектному варіанті, грн.;

$N_д$ – річна програма випуску продукції, грн.;

$E_н$ – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, $E_н$=0,16;

$K_д$ – додаткові капітальні витрати, грн.

$$K_д = B_{пк} + B_т + C_{ін} \cdot к_{ін} + C_{шп} \cdot Q - Ц_{ін.б} \cdot K_{тм} \cdot к_{ін}, \qquad (5.19)$$

де: $B_{пк}$ – вартість конструкторської підготовки виробництва інструменту та шпинделя верстата, грн.;

$B_т$ –вартість технологічної підготовки виробництва інструменту та шпинделя верстата, грн.;

$C_{ін}$, $C_{шп}$ - відповідно собівартість виготовлення інструменту та шпинделя (модернізації верстата), грн.;

$к_{ін}$ - потреба в інструменті для виконання річної програми випуску деталей, шт./рік;

Q – потреба у верстатах для виконання річної програми випуску деталей, шт.;

$Ц_{ін.б}$ - ціна базового інструменту, грн.;

$К_{тм}$ - коефіцієнт, який враховує транспортні, митні витрати та податок на додану вартість.

$$К_д = 105404 + 138080 + 24290 \cdot 1 + 108736 \cdot 1 - 100000 \cdot 1,32 \cdot 1 = 244510 \text{ грн.}$$

$$E_р = (30,685 - 9,771) \cdot 3600 - 0,16 \cdot 244510 = 57300 \text{ грн.}$$

5.5.2. Строк окупності додаткових капітальних вкладень:

$$T_{ок} = \frac{K_в}{\left(B_е^{баз} - B_е^{пр}\right) \cdot N_д} = \frac{244510}{(30,685 - 9,771) \cdot 3600} = 3,2 \text{ роки} \qquad (5.20)$$

5.5.3 У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників (табл. 5.8).

Таблиця 5.8.

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№	Показники	Одиниця	Варіанти		Зміна (±), %
			Базовий	Проект	
1.	Програма модернізації верстатів	шт./рік	1	1	-
2.	Річний випуск продукції	шт./рік	3600	3600	-
3.	Штучний час обробки деталі	хв.	10,0	3,14	-68,6
4.	Потреба в інструменті для виконання	шт.	1	1	-

	річної програми випуску деталей				
5.	Коефіцієнт завантаження верстата	$\eta_з$	0,15	0,05	-66,7
6.	Витрати підприємства, в т.ч.: - на підготовку виробництва - на інструмент - на модернізацію верстату	грн. грн. грн. грн.	132000 - 132000 -	376510 243484 24290 108736	+185,2 - -83,6 -
7.	Балансова вартість верстату	грн.	89369	140887	+57,6
8.	Залишкова вартість верстату на момент модернізації	грн.	-	35748	-
9.	Собівартість одиниці обробки із застосуванням інструменту та модернізованого верстату	грн.	30,685	9,771	-68,2
10	Строк окупності додаткових капітальних витрат	років	-	3,2	-
11	Річний економічний ефект	грн.	-	57300	-

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Дана кваліфікаційна робота виконана з дотриманням основних вимог діючих стандартів. Графічна частина оформлена згідно вимог ЕСКД.

Хонінгування отворів виконується комплектом інструментів (хонів), попередньо налагоджених на розмір. Кількість переходів (від 2 до 5) визначається величиною загального припуску, вимогами до точності та параметрами шорсткості оброблюваної поверхні.

Попереднє розмірне налагодження алмазного хону створює початковий натяг, який у момент врізання забезпечує інтенсивне руйнування (самозагострення) алмазоносного шару або деструкцію зв'язки для оголення нових зерен.

Через специфіку конструкції хонів виникають технологічні складнощі при забезпеченні точності обробки глухих отворів (недохід брусків до дна отвору).

Автоматичне регулювання діаметрального розміру хона безпосередньо в процесі обробки ускладнюється нестабільністю сил тертя в механізмі розтискання (конус-вставка) та приводі (наприклад, гвинтовому), що зумовлено стрибкоподібною зміною коефіцієнтів тертя спокою та руху (див. рис. 1.3 та 1.4).

Алмазне хонінгування отворів із переривчастою поверхнею характеризується складним динамічним станом системи, аналіз якого потребує проведення цільових експериментальних досліджень.

Існуючі схеми адаптивного керування процесом алмазного хонінгування мають суттєвий недолік — високу інерційність передачі сигналу зворотного зв'язку від зони різання до виконавчих органів верстата.

Застосування хона з гвинтовим пазом забезпечує рівномірне спрацювання абразивного шару по всьому периметру робочої поверхні.

При використанні хона з прямим пазом спостерігається нерівномірний знос: максимальна деградація абразивного шару локалізована в діаметральній площині, перпендикулярній до осі паза.

Під час обробки деталей розверткою з прямим пазом поле розсіювання розмірів (крива 3, поле допуску 6) становить 51,8 мкм.

Застосування розвертки з гвинтовим пазом дозволяє звузити поле розсіювання розмірів (крива 4, поле допуску 5) до 22 мкм.

При використанні інструмента з прямим пазом спрацювання абразивного шару має локальний характер і обмежене сектором з центральним кутом 38°.

Гвинтовий паз забезпечує більш рівномірне спрацювання робочого шару, розподілене по дузі з кутом 235°.

Використання шарніра нерівних кутових швидкостей призводить до зростання вібрації до 4,8 м/с^2, що збільшує похибку циліндричності отвору до 4 мкм.

Застосування шарніра рівних кутових швидкостей (ШРКШ) знижує амплітуду вібрації до 3 м/с^2, що забезпечує підвищення точності: похибка циліндричності не перевищує 2 мкм.

Експериментально встановлено нелінійну залежність деформації ΔD від тиску P у порожнині оболонкової форми, що описується емпіричною моделлю.

Отримана залежність має відхилення від теоретичної моделі, розрахованої за класичними методиками.

При реалізації двоступеневого циклу обробки поле розсіювання розмірів становить 30,6 мкм.

Триступеневий цикл дозволяє зменшити поле розсіювання до 25,0 мкм.

Використання триступеневого циклу з осциляцією (коливанням) тиску на робочій ступені забезпечує мінімальне розсіювання — 22,0 мкм.

Застосування триступеневого циклу зі змінним тиском робочої ступені призводить до розширення поля розсіювання до 35,0 мкм.

Визначено оптимальні параметри процесу (K_1 = 1,75; K_2 = 1,4), за яких досягається мінімальне відхилення від циліндричності (див. рис. 2.17).

Побудовано діаграму (рис. 2.16), яка дозволяє прогнозувати граничну точність обробки залежно від значень параметрів K_3 та K_1.

Науково підтверджено, що найбільш ефективним за критерієм точності є триступеневий цикл обробки з осциляцією тиску на робочій ступені.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 1. Lawrence, K.D.; Ramamoorthy, B. Multi-surface topography targeted plateau honing for the processing of cylinder liner surfaces of automotive engines. Appl. Surf. Sci. 2016, 365, 19-30.

2. Demirci, I.; Mezghani, S.; Yousfi, M.; El Mansori, M. Impact of superficial surface texture anisotropy in helical slide and plateau honing on ring-pack performance. Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol. 2015, 230, 1030-1037.

3. Deshpande, A.K.; Bhole, H.A.; Choudhari, L.A. Analysis of Super-Finishing Honing Operation with Old and New Plateau Honing Machine Concept. Int. J. Eng. Res. Gen. Sci. 2015, 3, 812-818.

4. Paswan, S.K.; Bedi, T.S.; Singh, A.K. Modeling and simulation of surface roughness in magnetorheological fluid based honing process. Wear 2017, 376-377, 1207-1221.

5. Arantes, L.J.; Fernandes, K.A.; Schramm, C.R.; Silveira Leal, J.E.; Piratelli-Filho, A.; Franco, S.D.; Arencibia, R.V. The roughness characterization in cylinders obtained by conventional and flexible honing processes. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2017, 93, 635-649.

6. Gehring-group: веб-сайт. URL: https://gehring-group.com/en/honing/tools/ дата звернення 20.01.2025

7. К.К. Щербина, А.І. Гречка В.А. Мажара, Т.В. Дяченко Kinematics of cutting process while honing holes with a hone with variable geometry of sticks. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 2020. – Вип.50. – С.159-164

8. Щербина К.К. Експериментальне дослідження деформації пружно-гвинтового хона / К.К. Щербина, М.М. Підгаєцький, В.А. Мажара, А.І. Гречка, Т.В. Дяченко // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: зб. наук. пр. – Кропивницький : ЦНТУ, 2022. – Вип. 5 (36). – Ч. 2. – С. 31-38.

9. Підгаєцький М.М. Дослідження повздовжньої сталості пружно-гвинтового хону / М.М. Підгаєцький, К.К. Щербина // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології машинобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – №6 (1282). – С.8-12.

10. K. Scherbyna Mechanics of contact interaction of elastic helical hone and machining surface / K. Scherbyna // Вісник Хмельницького національного

університету : Технічні науки. – Хмельницький: ХНУ, 2019. – №4 (275). – С.15-21.

11. М.М. Підгаєцький, К.К. Щербина, В.А. Мажара, Т.В. Дяченко Динамічний аналіз традиційної кінцевої ланки хонінгувальної головки Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 2019. – Вип.49. – С.194-200.

12. Підгаєцький М. М., Щербина К. К. Динамічний аналіз традиційних систем регулювання радіального розміру в процесі хонінгування отворів. Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки. Хмельницький: ХНУ. 2014. №3 (213). С.134-138

13. Патент на корисну модель № 105089 Кульково-клиновий хон /М.М. Підгаєцький, К.К. Щербина № u2015 06333 ; заявл. 26.06.2015 ; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 5. 2 с.

14. Патент на корисну модель № 154198 Хонінгувальна головка зі змінною геометрією /К.К. Щербина, М.М. Підгаєцький, А.І. Гречка, Д.Р. Торчілов, Т.В. Дяченко № u 2023 02189 ; заявл. 09.05.2023 ; опубл. 19.10.2023, Бюл. № 42. 4 с.

15. Щербина К.К., Шарікова А.О. Параметричний синтез кульково-клинового хону. // Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». Тези доповідей. – Тернопіль: ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2015.

16. Fritz Klocke Manufacturing processes. Grinding honing, lapping / RWTH AACHEN University / RWTH edition / Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009.

17. Zhang, Y.; Yang, Y.; Niu, J.; Gong, J. Study on the Impact of Honing Machine Reciprocating Reversing Acceleration upon Reticulate Pattern Trajectory. In Proceedings of the 1st International Conference on Mechanical Engineering and Material Science (MEMS 2012), Shanghai, China, 28–30 December 2012. [Google Scholar]

18. Edberg, S.; Landqvist, E. The Impact of Honing Process Parameters on the Surface Quality of Cylinder Liners. Master’s Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2015. [Google Scholar]

19. Harasymowicz, J.; Wantuch, E. Finishing. A Script for Students of Higher Technical Schools; Graphic Department of the Krakow University of Technology: Krakow, Poland, 1994.

20. Singh, V.; Agawal, V.P.; Deb, P. A decision making method for selection of finish process for a cylindrical surface. In Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Macao, China, 7–

10 December 2010; pp. 38–42.

21. Wang, J.; Shao, Y.; Zhu, X. Kinematics analysis and experimental study on ultrasonic vibration honing. In Proceedings of the International Technology and Innovation Conference 2009 (ITIC 2009), Xi'an, China, 12–14 October 2009.

22. Журило І.В. Конкурентоспроможність нової продукції промислово-виробничого призначення: теоретичні аспекти, методика прогнозування та забезпечення: Монографія. Кіровоград: ПВЦ «Мавік», 2007. 186 с.

23. Тормоса Ю. Г. Ціни та цінова політика: Навч. посібник. К.: КНЕУ, 2001. 122 с.

24. Журило І.В., Брагінець Т.П. Визначення технічного рівня (якості) і ціни реалізації нового виробу на ранніх етапах його проєктування. Проблеми і перспективи економічного розвитку в умовах модернізаційних процесів в Україні та світі: матеріали Всеук. наук.-практ. конф. (12 грудня 2023 р.). ЦНТУ, 2023. С. 49-52.

25. Годунко М.О. Основи 3D моделювання і робототехніки: Навч. посіб. для проведення практичних занять / М.О. Годунко, А.І. Гречка. – К. : 7БЦ, 2024. – 42 с.

26. Мажара В.А. Система автоматизованого проектування технологічного оснащення / В.А. Мажара, К.К. Щербина, А.М. Артюхов, С.А. Тененика, І.С. Шестаков // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – Вип. 54. – С. 12-23.

27. Мажара В. А. Контрольно-вимірювальні пристрої. Методичні вказівки для виконання самостійної роботи студентами денної та заочної форми навчання напрямку «Інженерна механіка» з профілюванням за спеціальністю «Технологія машинобудування». – Кіровоград: КНТУ, 2010. – 48 с.

28. Мажара В. А. Технологічна оснастка. Методичні вказівки для виконання самостійної роботи студентами денної форми навчання напрямку «Інженерна механіка» з профілюванням за спеціальністю «Технологія машинобудування». – Кіровоград: КНТУ, 2009. – 44 с.

29. ДСТУ ISO 128-1:2005 Технічні Кресленики. Загальні принципи оформлення. [Чинний від 2019–01–01]. Київ, 2018.

30. ДСТУ EN ISO 10209:2018 Технічна документація на продукцію. Словник термінів щодо технічних креслеників, визначення виробів і відповідної документації. [Чинний від 2008-01-01]. Київ, 2008.

31. ДСТУ ISO 5457:2006 Документація технічна на вироби. Розміри та формати. [Чинний від 2008-01-01]. Київ, 2008.

32. ДСТУ ISO 5455:2005 Кресленики технічні. Масштаби. [Чинний від 2006-07-01]. Київ, 2006.

33. ДСТУ ISO 3098-0:2006 Документація технічна на вироби. Шрифти. Загальні вимоги. [Чинний від 2008-01-01]. Київ, 2006.

34. ДСТУ ISO 128-20:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи подавання. Частина 20. Основні положення про лінії. [Чинний від 2007- 04-01]. Київ, 2007.

35. ДСТУ ISO 128-21:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 21. Лінії, виконані автоматизованим проектуванням. [Чинний від 2007-04-01]. Київ, 2007.

36. ДСТУ ISO 128-22:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 22. Основні положення та правила застосування 27 ліній виносок і полиць ліній-виносок. [Чинний від 2007-04-01]. Київ, 2007.

37. ДСТУ ISO 128-24:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 24. Лінії на машинобудівних кресленниках. [Чинний від 2007-04-01]. Київ, 2007.

38. ДСТУ ISO 128-30:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 30. Основні положення про види. [Чинний від 2007- 04-01]. Київ, 2007.

39. ДСТУ ISO 128 34:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 34. Види на машинобудівних кресленниках. [Чинний від 2007-04-01]. Київ, 2007.

40. ДСТУ ISO 128-40:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 40. Основні положення про розрізи та перерізи. [Чинний від 2007-04-01]. Київ, 2007.

41. ДСТУ ISO 128-44:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 44. Розрізи та перерізи на машинобудівних кресленикаx. [Чинний від 2006-07-01]. Київ, 2005.

42. ДСТУ ISO 128 50:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 50. Основні положення про зображення розрізів і перерізів. [Чинний від 2006-07-01]. Київ, 2006.

43. ДСТУ EN ISO 1302:2018 Технічні вимоги до геометричних характеристик продукції (GPS). Познака зовнішньої текстури в технічній документації на продукцію. [Чинний від 2019-01-01]. Київ, 2018.

44. ДСТУ ISO 129 1:2007 Кресленики технічні. Проставлення розмірів і допусків. Частина 1. Загальні принципи. [Чинний від 2009-07-01]. Київ, 2010.

45. ДСТУ ISO 286-1-2002 Допуски і посадки за системою ISO. Частина 1. Основи допусків, відхилів та посадок. [Чинний від 2003-10-01]. Київ, 2003. 28

46. ДСТУ EN ISO 2692:2018 Технічні вимоги до геометричних характеристик продукції (GPS). Визначення геометричних допусків. Вимоги щодо максимуму матеріалу (MMR), мінімуму матеріалу (LMR) та взаємодії (RPR). [Чинний від 2019-01-01]. Київ, 2018.

47. ДСТУ ISO 2768-1:2001 Основні допуски. Частина 1. Допуски на лінійні та кутові розміри без спеціального позначення допусків. [Чинний від 2003-01-01]. Київ, 2002.

48. ДСТУ ISO 2768-2:2001 Основні допуски. Частина 2. Допуски геометричні для елементів без спеціального позначення допусків. [Чинний від 2003-01-01]. Київ, 2002.

49. ДСТУ ISO 5458-2001 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Встановлення геометричних допусків. Позиційні допуски. [Чинний від 2003-01-01]. Київ, 2002.

50. ДСТУ EN ISO 5459:2018 Технічні вимоги до геометричних характеристик продукції (GPS). Геометричні допуски. Бази та системи баз. [Чинний від 2019-01-01]. Київ, 2018.

51. ДСТУ ISO 7083:2009 Кресленики технічні. Умовні познаки геометричних допусків. Співвідношення та розміри. [Чинний від 2011-07-01]. Київ, 2015.

52. ДСТУ ISO 10578:2014 Кресленики технічні. Допуски орієнтування та розташування. Виступне поле допуску. [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015.

53. ДСТУ EN ISO 6433:2018 Кресленики технічні. Позначення деталей. [Чинний від 2019-01-01]. Київ, 2018.

54. ДСТУ EN ISO 7200:2005 Розроблення технічної документації. Графи у штампах та основних написах. [Чинний від 2006-10-01]. Київ, 2007.

55. ДСТУ ISO 7573:2006 Кресленики технічні. Специфікація. [Чинний від 2001-06-27]. Київ, 2008.

56.