

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 першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему:

«Розробка гнучкої технології механічної обробки зубців шестерень гідравлічних машин»

Виконав здобувач вищої освіти 3мб курсу
групи ПМ-23мб-3

ОПП «Комп'ютерний інжиніринг технологій,
робототехніка і 3D-друк»

спеціальності 131 «Прикладна механіка»

_____ Артем МЕТКИЙ

Керівник роботи: к.т.н., ст. викладач

_____ Антон АПАРАКІН

Рецензент: к.т.н., доц.

_____ Любов ОЛІЙНІЧЕНКО

Кропивницький 2026

Центральноукраїнський національний технічний університет	
Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	перший (бакалаврський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	131 Прикладна механіка
Освітньо-професійна програма	Комп'ютерний інжиніринг технологій, робототехніка і 3D-друк

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММР
_____ Андрій ГРЕЧКА

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА

Меткого Артема Олександровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка гнучкої технології механічної обробки зубців шестерень гідравлічних машин

2. Керівник роботи: _____ к.т.н., ст. викл., Антон АПАРАКІН

3. Строк подання роботи до захисту _____ « ____ » червень 2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є розробка гнучкої технології механічної обробки зубців шестерень гідравлічних машин, що забезпечує підвищення точності, якості та економічної ефективності виробничого процесу.

Завдання:

- проаналізувати традиційну технологію механічної обробки зубчастих коліс, її переваги та недоліки;
- розробити пропозиції щодо раціоналізації традиційної технології, створюючи передумови для реалізації гнучкої технології зубообробки;
- для реалізації запропонованої технології, розробити концепцію верстата зубообробного центру з ЧПУ.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
РОЗДІЛ 1	Антон АПАРАКІН		
РОЗДІЛ 2	Антон АПАРАКІН		
РОЗДІЛ 3	Антон АПАРАКІН		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1	ВСТУП	Травень 2026	вик.
2	РОЗДІЛ 1	Травень 2026	вик.
3	РОЗДІЛ 2	Травень 2026	вик.
4	РОЗДІЛ 3	Червень 2026	вик.
5	ВИСНОВКИ	Червень 2026	вик.
6	Графічна частина та оформлення	Червень 2026	вик.

Дата видачі завдання « » 2026 р.

Керівник роботи _____ Антон АПАРАКІН
(підпис)

Завдання прийнято до виконання « » _____ 2026 р.

Здобувач _____ Артем МЕТКИЙ
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Меткий А. О. Розробка гнучкої технології механічної обробки зубців шестерень гідравлічних машин : кваліфікаційна бакалаврська робота : спец. 131 Прикладна механіка / наук. кер. А. Р. Апаракін ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2026. 42 с.

Кресленників – разом 3 аркуші формату А1.

Метою є розробка гнучкої технології механічної обробки зубців шестерень гідравлічних машин, що забезпечує підвищення точності, якості та економічної ефективності виробничого процесу.

Актуальність зумовлена необхідністю підвищення ефективності механічної обробки зубців шестерень гідравлічних машин шляхом розробки гнучкої технології, яка забезпечує покращення якісних показників обробки, підвищення точності геометрії зубчастого вінця та скорочення собівартості виготовлення. Вирішення цієї задачі має як теоретичне, так і практичне значення для підприємств, що виготовляють гідравлічне обладнання.

В роботі виконано аналіз традиційної технології механічної обробки зубчастих коліс, визначено основні її переваги та недоліки. Розроблено ряд пропозицій щодо раціоналізації існуючої технології, та створено передумови для реалізації гнучкої технології зубообробки. Для реалізації запропонованої технології розроблено концепцію верстата – зубообробного центру з ЧПУ.

технологія, шестерня, зубофрезерування, фреза, механічна обробка

ANNOTATION

Metkyi A. O. Development of flexible technology for machining gear teeth of hydraulic machines : qualifying bachelor's thesis : spec. 131 Applied mechanics / scientific director A. R. Aparakin; Central Ukrainian National Technical University - Kropyvnytskyi: CUNTU, 2026. 42 p.

Drawings - a total of 3 sheets of A1 format.

The purpose of the work is to develop a flexible technology for machining gear teeth of hydraulic machines, which ensures increased accuracy, quality and economic efficiency of the production process.

The relevance of the work is due to the need to increase the efficiency of machining gear teeth of hydraulic machines by developing a flexible technology that ensures improved quality indicators of machining, increased accuracy of the geometry of the gear ring and reduced manufacturing costs. Solving this problem has both theoretical and practical significance for enterprises that manufacture hydraulic equipment.

The work analyzes the traditional technology for machining gears, identifies its main advantages and disadvantages. A number of proposals have been developed for the rationalization of the existing technology, and prerequisites have been created for the implementation of flexible gear machining technology. To implement the proposed technology, the concept of a machine tool - a CNC gear machining center has been developed.

technology, spur, gear hobbing, milling cutter, mechanical processing

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи на тему:

**«Розробка гнучкої технології механічної обробки зубців шестерень
гідравлічних машин»**

КРБ.ПМ.26.78.23.00.00

Виконав здобувач вищої освіти 3мб курсу
групи ПМ-23мб-3
ОПП «Комп'ютерний інжиніринг
технологій, робототехніка і 3D-друк»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»

_____ Артем МЕТКИЙ

Керівник роботи к.т.н., ст. викл.

_____ Антон АПАРАКІН

ЗМІСТ

Вступ	7
1. Аналіз процесу різання при зубофрезеруванні черв'ячними фрезами....	9
1.1. Огляд існуючої технології нарізання зубців.....	9
1.2. Знос черв'ячних зуборізних фрез.....	13
1.3. Висновки.....	17
2. Синтез схеми різання евольвентних зубчастих профілів в умовах розділення процесу та вільного стружкоутворення (РПВС).....	19
2.1. Загальні положення.....	19
2.2. Попереднє прорізання впадин зубців.....	19
2.3. Контурне зубофрезерування.....	20
2.4. Висновки.....	24
3. Конструювання верстата та його окремих модулів для реалізації зубообробки в умовах РПВС.....	25
3.1 Аналіз кінематики відомих верстатів	25
3.2 Аналіз і синтез компоновки верстата для здійснення зубонарізання в умовах РПВС	27
3.3 Кінематика верстата для здійснення обробки в умовах РПВС.....	33
3.4 Аналіз кінематики відомих верстатів.....	34
3.5 Забезпечення синхронності руху електродвигунів.....	38
3.6 Висновки.....	39
Загальні висновки.....	40
Перелік джерел посилення.....	41

ВСТУП

У сучасному машинобудуванні, незважаючи на активний розвиток електромеханічних систем приводу, об'ємний гідропривід зберігає міцні позиції у широкому спектрі галузей: будівельній та підйомній техніці, сільськогосподарському машинобудуванні, авіації, суднобудуванні, важкій промисловості та верстатобудуванні. Головна перевага об'ємного гідроприводу перед електроприводом полягає у значно кращих масо-габаритних характеристиках при забезпеченні еквівалентної потужності, що робить його незамінним у системах із жорсткими вимогами до компактності.

Серед різноманітних типів гідравлічних машин роторного типу - гвинтових, пластинчастих, аксіально- та радіально-поршневих - шестеренні гідромашини посідають особливе місце завдяки поєднанню відносної простоти конструкції, надійності в експлуатації та низької собівартості виготовлення [1]. Шестеренні насоси та гідродвигуни широко застосовуються в гідросистемах із робочим тиском до 20...30 МПа, а принцип їх оборотності дозволяє використовувати одну й ту саму конструкцію як у режимі насосу, так і гідродвигуна [2].

Разом із тим, шестеренні гідромашини пред'являють надзвичайно високі вимоги до точності та якості виготовлення деталей, насамперед - зубчастих коліс. Саме якість обробки зубчастого вінця шестерень безпосередньо визначає ключові експлуатаційні характеристики кінцевого виробу: рівень шуму та вібрацій, величину об'ємних втрат на внутрішні перетікання, ресурс насосу та його коефіцієнт корисної дії. Будь-яке відхилення від заданих параметрів точності призводить до погіршення герметичності робочих камер та зниження ефективності всього гідроприводу.

Незважаючи на значний практичний досвід у виготовленні шестерень гідравлічних машин, питання розробки гнучкої та ефективної технології їх механічної обробки залишається актуальним. Традиційні технологічні рішення, орієнтовані на конкретні типорозміри та умови виробництва, не

забезпечують необхідної гнучкості в умовах дрібно- та середньосерійного виробництва, а також не повною мірою відповідають сучасним вимогам щодо зниження собівартості та підвищення якості обробки.

Актуальність даної роботи [3-5] зумовлена необхідністю підвищення ефективності механічної обробки зубців шестерень гідравлічних машин шляхом розробки гнучкої технології, яка забезпечує покращення якісних показників обробки, підвищення точності геометрії зубчастого вінця та скорочення собівартості виготовлення. Вирішення цієї задачі має як теоретичне, так і практичне значення для підприємств, що виготовляють гідравлічне обладнання.

Мета роботи: розробка гнучкої технології механічної обробки зубців шестерень гідравлічних машин, що забезпечує підвищення точності, якості та економічної ефективності виробничого процесу.

У роботі необхідно проаналізувати традиційну технологію механічної обробки зубчастих коліс, її переваги та недоліки, та розробити пропозицію щодо раціоналізації – гнучку технологію зубообробки. Для реалізації запропонованої технології необхідно розробити концепцію верстата зубообробного центру з ЧПУ.

1 Аналіз процесу різання при зубофрезеруванні черв'ячними фрезами

1.1 Огляд існуючої технології нарізання зубців шестерень

Нарізання зубців являється найбільш працемістким процесом в технології виготовлення зубчастих коліс. На нього витрачається 50...60% загальної працемісткості обробки зубчастого колеса. Зазвичай зубонарізання виконують зубофрезеруванням з наступним шевінгуванням. Такий процес забезпечує високу продуктивність і необхідну точність коліс.

Зубофрезерування - найбільш продуктивний метод зубонарізання, хоча в порівнянні з точінням, торцевим фрезеруванням, зенкеруванням та іншими видами обробки зубофрезерування являється операцією мало продуктивною, що пояснюється низькими швидкостями різання. Якщо при точінні швидкості різання 100...200 м/хв вважаються звичайними, то зубофрезерування ведеться зі швидкостями 15...80 м/хв, а при обробці коліс із високоміцних матеріалів швидкість різання не перевищує 5 м/хв. Подачаі також невеликі, зазвичай в межах 1,5...2,5 мм/об і тільки в деяких випадках сягають 6 мм/об. Внаслідок низької продуктивності використовується великий парк верстатів, значні виробничі площі та витрачається велика кількість дорогих зуборізних фрез [6].

Проведені багаточисельні дослідження з метою зниження вартості виготовлення коліс. В результаті виконаних робіт намічено декілька напрямків, що підвищують стійкість та продуктивність черв'ячних фрез [7].

Представляють певний інтерес твердосплавні зуборізні фрези для чистового зубонарізання коліс з високоміцних матеріалів. Вони мають негативні передні кути на бічних різальних кромках, близько 15...65°. Однак поширенню твердосплавного інструменту перешкоджають низька міцність і нестабільність якості твердого сплаву, в результаті чого виникають часті поломки, викришування, сколи і значна трудомісткість в заточенні фрез.

Всі існуючі методи підвищення продуктивності зубофрезерування не змінюють схеми різання. Між тим схема різання стандартної черв'ячної фрези досить недосконала. Одним з її недоліків є нерівномірне навантаження зубців уздовж витка. Зубець, найбільш віддалений від міжосьового перпендикуляра фреза-заготовка, зрізає товстіший шар. По мірі наближення до міжосьового перпендикуляру зубці зрізають тонкі шари. Зі збільшенням подачі в процес різання вступають більш віддалені зубці, які зрізають самі товсті стружки. Вважається, що величина подачі лімітується міцністю крайнього, найбільш навантаженого зубця, і якщо всі зубці завантажити рівномірно, тобто частину навантаження з крайніх зубців перекласти на зубці, розташовані ближче до центрального зубця, то фреза здатна працювати з подачами, які у багато разів перевищують звичайно прийняті. Шари найбільших товщини і перетину звичайно зрізують вершинні кромки, тому перерозподіл навантаження роблять на вершинах зубців за рахунок зміни їх висоти.

Найбільшу допомогу при вивченні роботи окремих зубців фрези дасть вивчення контактної області. На рис. 1.1 показане контактне поле при зустрічному фрезеруванні прямозубих коліс [8, 9].

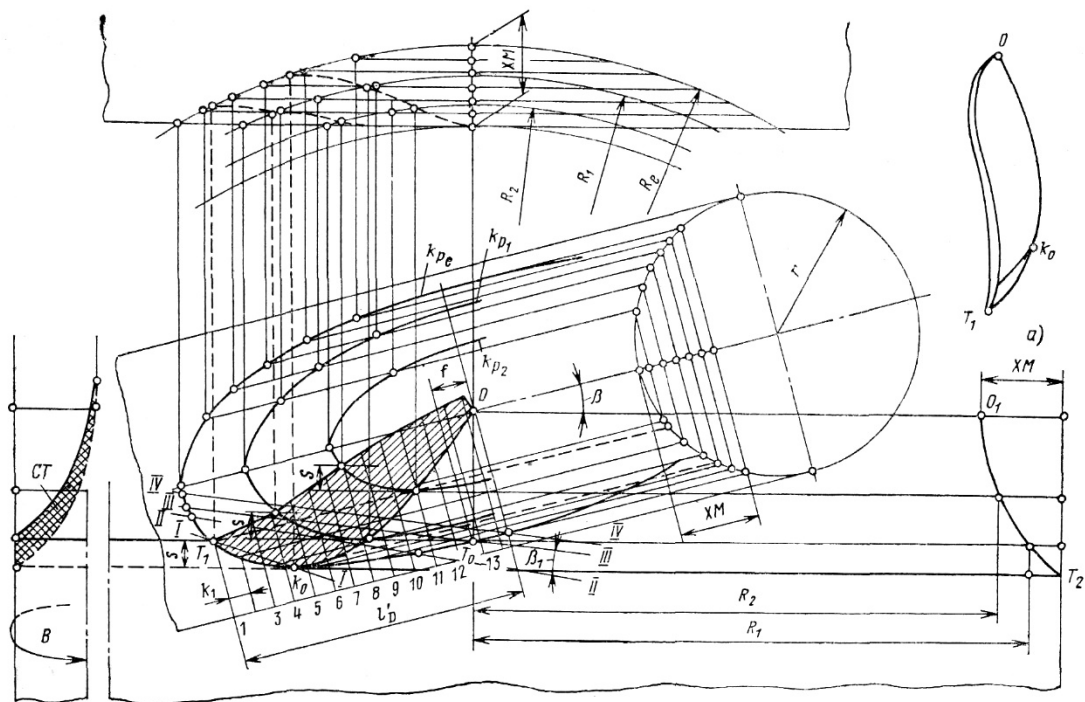


Рисунок 1.1 – Побудоване контактне поле при зустрічному черв'ячному фрезеруванні прямозубих коліс.

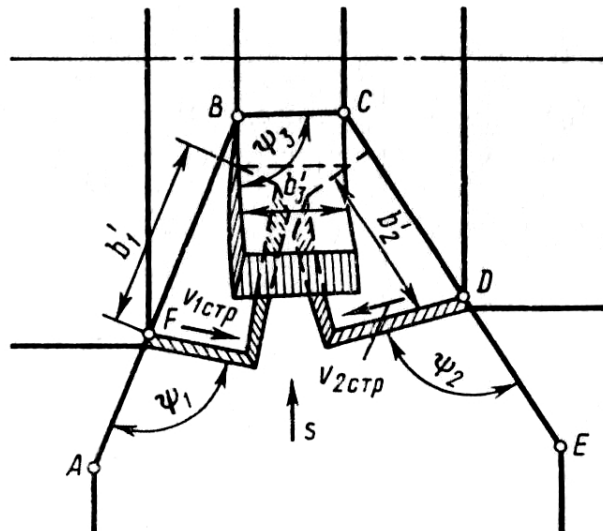
На отриманому контактному полі зрізається метал, перетин якого відповідає ділянці СТ. Найбільша кількість металу зрізається в середній частині контактного поля, а найбільший перетин зрізуваного металу відноситься до точок T_1 і K_0 . Але так як черв'ячна фреза на будь-якій її ділянці має однакове число зубців, то на кожен зубець фрези приходить неоднакова товщина стружки і неоднаковий обсяг зрізуваного металу. Найбільша товщина металу зрізується одним зубцем в точці T_1 .

Подання області різання у вигляді контактного поля дозволяє також визначити довжину зрізаного шару металу для кожного зубця фрези. Якщо довжину контактного поля розділити на рівні ділянки K_1 , то в міру наближення до точки 0 зубці зрізають стружку різної довжини. При розгляді контактного поля, виходячи з відносного визначення тривалості роботи кожного зубця і навантаження на його різальну частину, можна встановити, що перший зубець має найбільше навантаження, але працює нетривало, а другий зубець має менше навантаження, але працює більш тривалий час і т. д.

Починаючи з восьмого зубця і по тринадцятий зменшується навантаження і тривалість роботи зубців. Враховуючи це, можна зробити висновок, що межею збільшення подачі є найбільше короткочасне навантаження на зубець в точці T_1 , що викликає ударну роботу фрези, а межею зносостійкості зубців є тривалість їх роботи. Таким чином, найбільший знос фрези відбувається на ділянці від п'ятого зубця по десятій; на ділянці від першого по третій зубець робота зубців короткочасна, але з великим навантаженням - з ударами зубця об метал.

Проведений короткий аналіз основних напрямків підвищення ефективності продуктивності при зубофрезеруванні шестерень показує, що хоча за останні роки були проведені фундаментальні дослідження і отримано багато цінних результатів проблема підвищення продуктивності на зубофрезерних операціях і зниження витрати дорогих зуборізних фрез є актуальною. У більшості випадків зубо- та шліцефрезерування роблять стандартними черв'ячними фрезами з швидкорізальної сталі з порівняно

низькими швидкостями різання: 30...40 м/хв, і подачами 1,5...2,5 мм/об. Низька продуктивність обумовлюється недосконалістю схеми різання. Кожен зубець, що прорізає западину колеса, працює двома або трьома кромками, зрізаючи Г- або П- подібний шар із змінною по контуру товщиною [10, 11]. Параметри сходу стружок показані на рис. 1.2.



b'_1, b'_2, b'_3 - ширина стружок вздовж різних кромки; ψ_1, ψ_2, ψ_3 – кут збігу стружок; $V_{стр}$ - напрямок сходу стружки; S - напрямок подачі.

Рисунок 1.2 – Параметри сходу стружок при черв'ячному зубофрезеруванні.

Шар найбільшої товщини зрізає вершинна кромка зубця. Товщина його збільшується до вихідного кута. Більш тонкий шар, що збільшується до вершини зубця, зрізає вхідна бічна кромка і самий тонкий шар, який зменшується до вершини - вихідна бічна кромка.

Найбільш інтенсивний знос слід було б очікувати по задніх поверхнях вершинних або вхідних кромки зубців фрези і менше повинні зношуватися задні поверхні вихідних кромки. В дійсності - навпаки: зношуються сильніше задні поверхні вихідних кромки поблизу кутів, там, де зрізаються найтонші шари, причому на цих ділянках знос часто супроводжується проривом різальних кромки. Такий характер зносу властивий не тільки черв'ячним зуборізним і шліцевим фрезам, але, взагалі, всім зуборізним інструментам, які

оброблюють зубці по методу обкатки - зуборізні довбачі, гребінки і зубострогальні різці.

Таким чином, при одночасній роботі різальних кромок можливе утворення двох типів зливної стружки:

1. без розриву по суміжним боковим поверхням – монолітної;
2. з розривом по суміжним боковим поверхням.

Типи зливної стружки зображені на рис. 1.3.

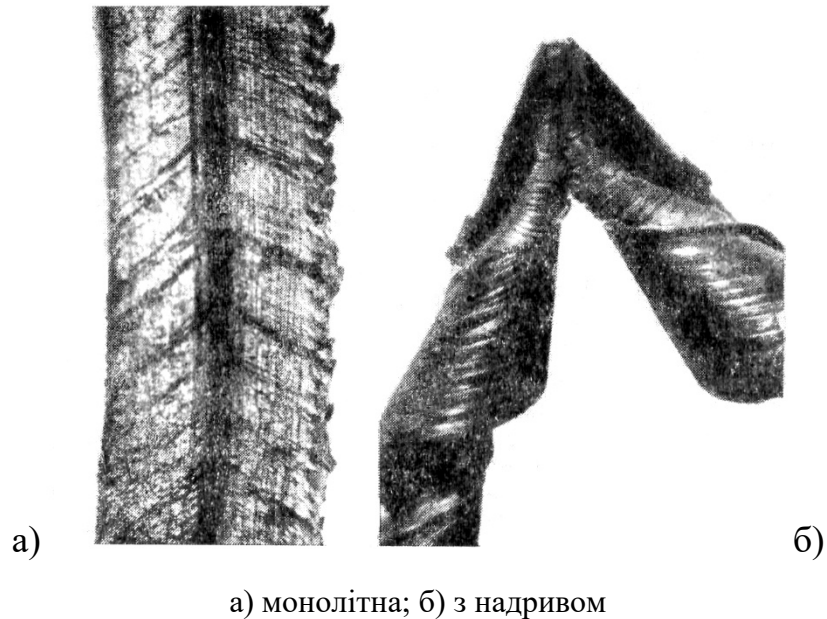


Рисунок 1.3 – Типи зливної стружки.

1.2. Знос черв'ячних зуборізних фрез

У черв'ячних зуборізних фрез при нарізанні коліс зубці зазвичай ріжуть двома або трьома різальними кромками [12]. Знос зубців стандартної черв'ячної фрези відбувається як по передній, так і по задній поверхнях. Знос зубця черв'ячної фрези показано на рис. 1.4.

На передній поверхні уздовж різальних кромок утворюються лунки різних розмірів. Найбільш глибока лунка у вершинної кромки ВС. Вона трохи відступає від входної різальної кромки CD і наближається до вихідної АВ, знижуючи тим самим її міцність.

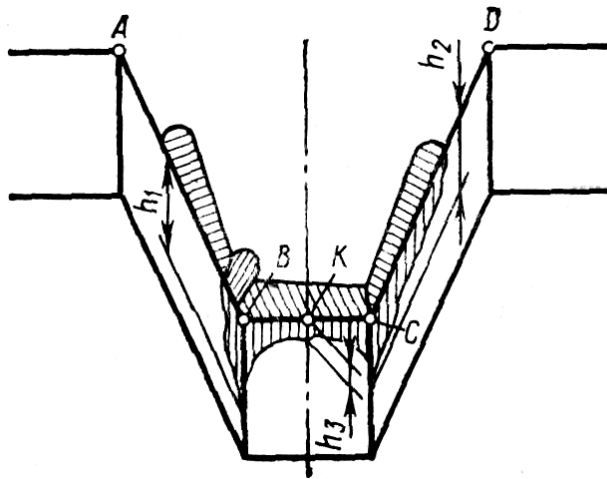


Рисунок 1.4 – Знос зубця черв'ячної фрези.

Розміри лунки біля вхідної кромки менше, ніж у вершинної, у вихідній кромці майже по всій довжині спостерігаються тільки сліди зносу. Поблизу вершини зубця відбувається різке збільшення зносу з утворенням глибокої лунки. Наявність інтенсивного стирання цієї ділянки вказує, що утворення стружки тут ускладнено.

Знос задніх поверхонь уздовж різального контуру відбувається також нерівномірно. Задня поверхня вершинної кромки зношується слабо. Ширина фаски зносу майже однакова і тільки підвищується у куточків. Знос задньої поверхні вхідної кромки збільшується до вершинної кромки. Зростання зносу викликається збільшенням як товщини зрізаного шару, так і швидкості різання з віддаленням точки від вісі фрези. По абсолютній величині знос задньої поверхні вхідної кромки вище, чим знос задньої поверхні у вершинній, хоча остання знімає більш товсті шари. Це пояснюється меншими задніми кутами [13] та більшою інтенсивністю деформації зрізаного шару боковою кромкою.

Найбільш сильно зношується задня поверхня вихідної кромки, не дивлячись на те, що товщина шару мала. Знос локалізується біля вершини в формі трикутника, одна сторона котрого приблизно рівна ширині лунки на передній поверхні. Задня поверхня решти різальної кромки зношується слабо.

На рис. 1.5 показано вид катастрофічно зношеного зубця.

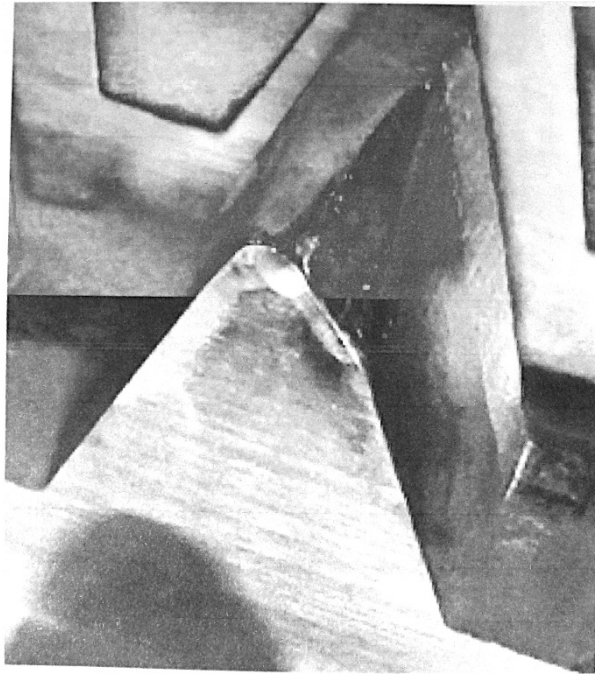


Рисунок 1.5 – Вид катастрофічно зношеного зубця.

На рис. 1.6 приведені криві зносу h по заднім поверхням зубців фрези вздовж витка [8]. Криві показують нерівномірність зносу зубців вздовж витка та величину зносу задніх поверхонь вихідних кромek відносно вхідних та вершинних.

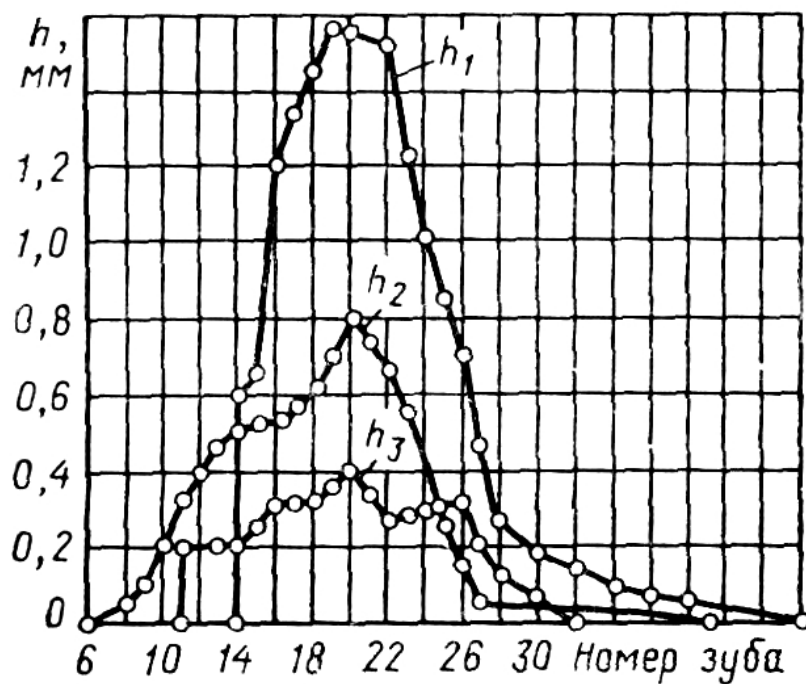


Рисунок 1.6 – Криві зносу по заднім поверхням зубців фрези вздовж витка.

На відміну від зубців довбача і зубострогальних різців, бокові кромки зубців черв'ячних фрез зрізають вузькі шари (рис. 1.7, [8]). Тому одні зубці зрізають монолітні стружки, а інші - стружки з розривом. У зв'язку з різним типом стружки, характер зносу також неоднаковий. Одна частина зубців зношується без руйнування вихідних кромки, а інша - з руйнуванням.

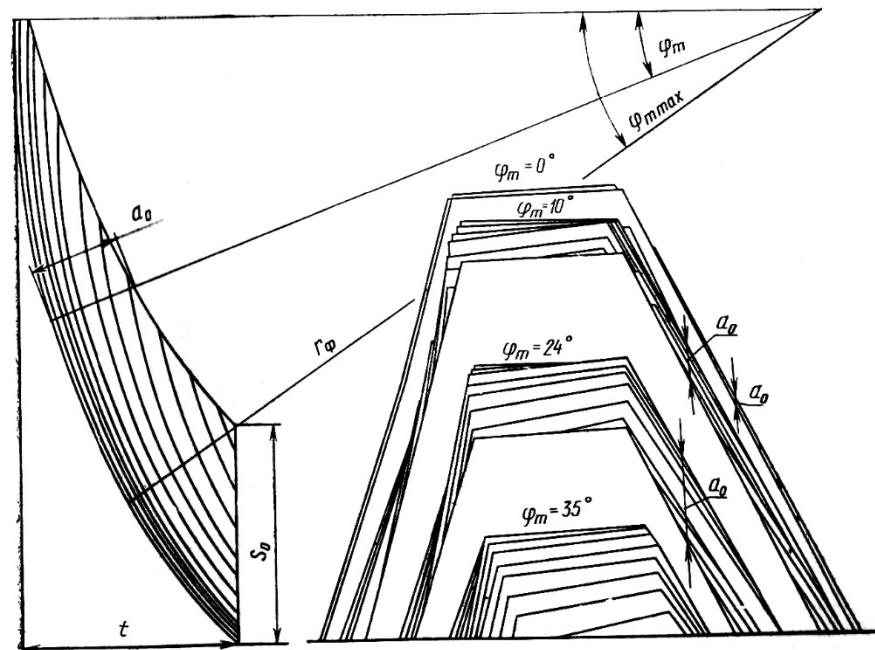


Рисунок 1.7 – Схема зйому стружок з впадини заготовки зубцями фрези.

На основі аналізу характеру зносу черв'ячних зуборізних фрез можна зробити наступні висновки:

1. Знос зубця по різальному периметру неоднаковий. Найбільший знос має задня поверхня ділянки вихідної різальної кромки, що прилягає до кута, менший – задня поверхня вхідної кромки, та самий менший – задня поверхня вершинної кромки.

2. Більш інтенсивний знос задньої поверхні вихідної кромки відносно вхідної при утворенні стружки з розривом являється наслідком виникнення зминання, викликаного зменшенням товщини зрізуваного слою при вершині зубця, що приводить до прориву різальної кромки та підвищеному зносу його задньої поверхні.

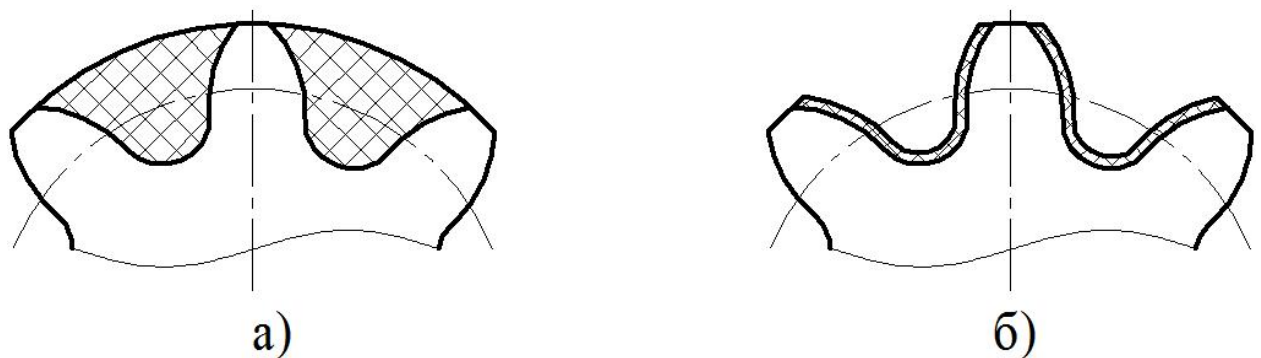
3. Основною причиною підвищеного зносу задньої поверхні вихідної кромки відносно вхідної при утворенні монолітної стружки є відхилення стружок, зрізаних вхідною і вершинною кромками у бік вихідної різальної кромки. В результаті збільшується деформація зсуву в шарах, зрізаних вихідною кромкою, і знижується деформація зсуву в шарах, зрізаних вхідною кромкою.

4. З утворенням двох типів стружки - монолітною та з розривом по суміжних бічних поверхнях - виникають і два типи зносу зубців черв'ячних фрез: без прориву різальних кромок і з проривом. Другий вид є більше всього небажаним. У цьому випадку стирання поверхонь протікає швидше, і знос цих зубців лімітує стійкість фрези.

1.3 Висновки

Існуюча технологія має ряд істотних недоліків, що відбиваються на собівартості та якості обробки:

1. Близько $\approx 90\%$ обсягу металу, розташованого у міжзубовій западині, видаляється геометрично точним інструментом на кінематично точному верстаті, що вимагає великих витрат на придбання та утримання засобів технічного оснащення. Схема припуску зображена на рис. 1.8.



а) припуск, що видаляється при зубофрезеруванні черв'ячною фрезою.

б) припуск, що залишається на чистовий прохід.

Рисунок 1.8 – Схема припуску, що видаляється черв'ячними фрезами.

2. Процес різання відбувається в умовах невідного стружкоутворення, що призводить до значних сил різання, надмірного зносу інструменту та втрат ресурсу верстата.

3. Додатковим джерелом зниження стійкості інструменту є малі значення задніх кутів ($\approx 2^\circ$) на бічних різальних кромках черв'ячних фрез.

4. Конструктивне виконання черв'ячних фрез не дає можливості оснастити їх різальними елементами з сучасних надтвердих матеріалів.

5. Черв'ячні фрези вимагають точного переточування по передній грані, зі спеціальною заправкою шліфувального круга.

6. Як правило, знос зубців черв'ячних фрез нерівномірний, особливо при обробці зубчастих коліс з малим числом зубців. Нерівномірність коливається в межах 2,5 ... 3 рази за величиною зносу.

7. Значні сили різання при зубофрезеруванні створюють напругу в поверхневому шарі деталі (наклеп), який сприяє термічній деформації зубця.

8. Жорсткий зв'язок швидкості різання з кінематикою обкатки не дає можливості збільшення згаданої швидкості різання через обмеження швидкості ковзання в ділильної передачі верстата.

2 Синтез схеми різання евольвентних зубчастих профілів в умовах розділення процесу та вільного стружкоутворення (РПВС)

2.1 Загальні положення

Враховуючі тенденцію в механообробному виробництві, направлену на реалізацію гнучких технологій, найбільш доцільно застосувати аналогічне технічне рішення при створенні технології обробки зубців шестерень гідравлічних насосів.

Пропонується реалізувати гнучку технологію використовуючи два взаємодоповнюючих технічних рішення:

1. Попередню обробку, с видаленням $\approx 90\%$ матеріалу міжзубової впадини, здійснювати на кінематично простому верстаті, простим різальним інструментом, в умовах вільного стружкоутворення.

2. Чистову обробку здійснювати в умовах обкату на зубофрезерному верстаті, оснащеному відповідними кінематичними ланцюгами та укомплектованого кроковими двигунами [14]. В якості інструмента застосовується однозуба фреза, головна різальна кромка якої являється продовженням радіусів кривизни евольвенти в зоні її активної частини.

2.2 Попереднє прорізання впадин зубців

Схема попереднього прорізання зубців представлена на рис. 2.1.

Обробка може вестись на фрезерних верстатах комплектом дискових фрез. Обробка ведеться в умовах вільного стружкоутворення (рис. 2.1,б).

Враховуючи конструктивне виконання фрез, вони можуть бути оснащені пластинками з матеріалів, працюючих на високих швидкостях різання (до 200 м/хв)

Схема припуску при такому попередньому прорізанні показана на рис. 2.2.

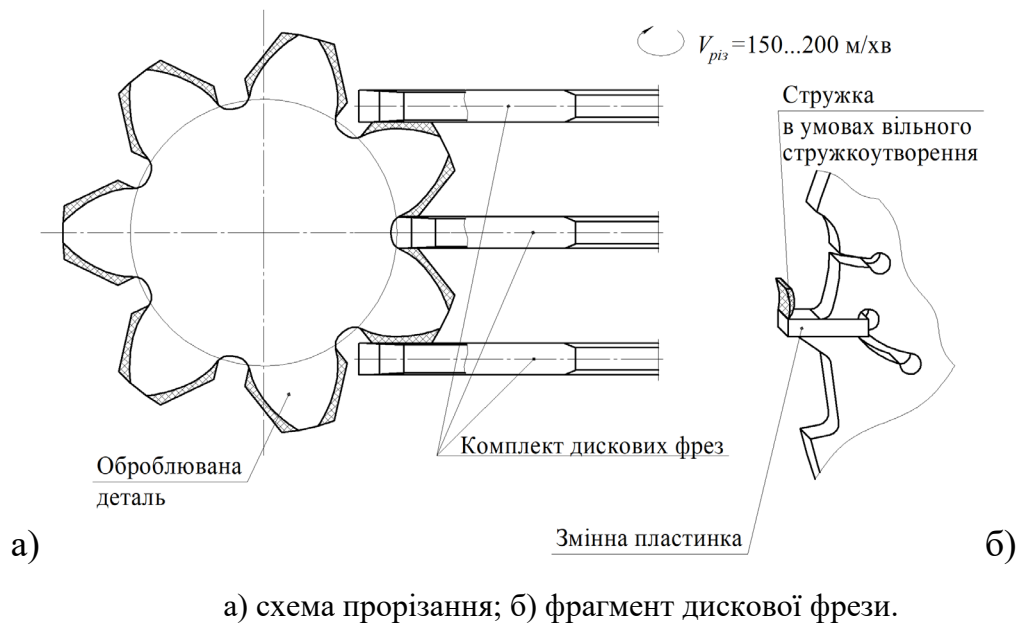


Рисунок 2.1 - Схема попереднього прорізання зубців.

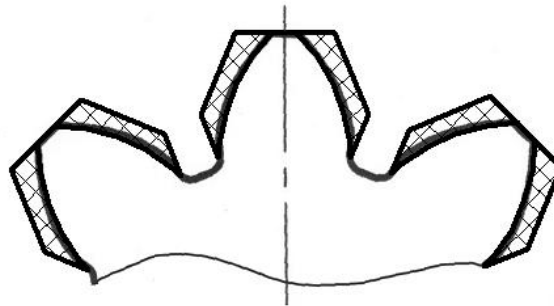


Рисунок 2.2 - Схема припуску, що залишається на чистовий прохід.

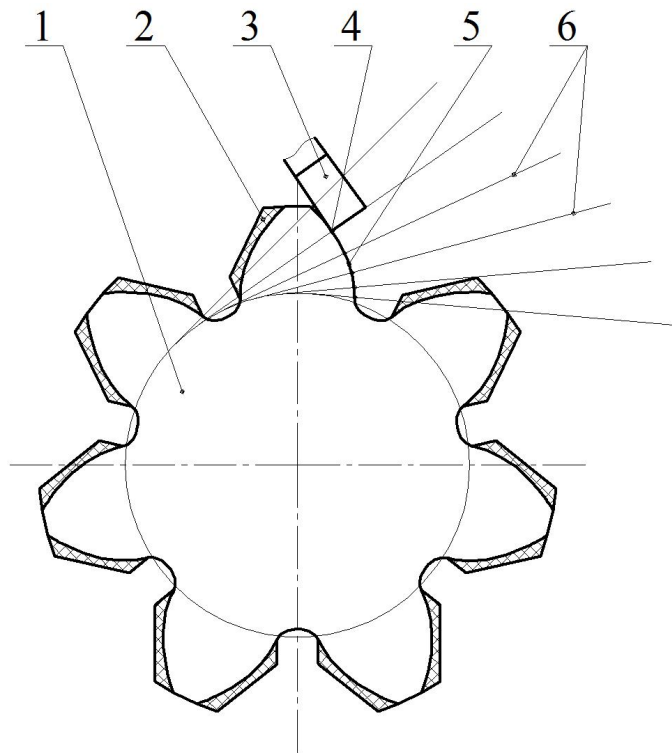
Така схема припуску являється раціональною для наступної обробки, так як при ній дно міжзубової впадини, де з'являються найбільш скрутні умови стружкоутворення, оброблене остаточно.

2.3 Контурне зубофрезерування

Контурне зубофрезерування являє собою спосіб обробки зубчастих профілів, по попередньо формоутвореним впадинам, простим лезвійним інструментом в умовах вільного різання [15].

Особливості запропонованого способу зубофрезерування евольвентних поверхонь зубців циліндричних зубчастих коліс пояснюються далі.

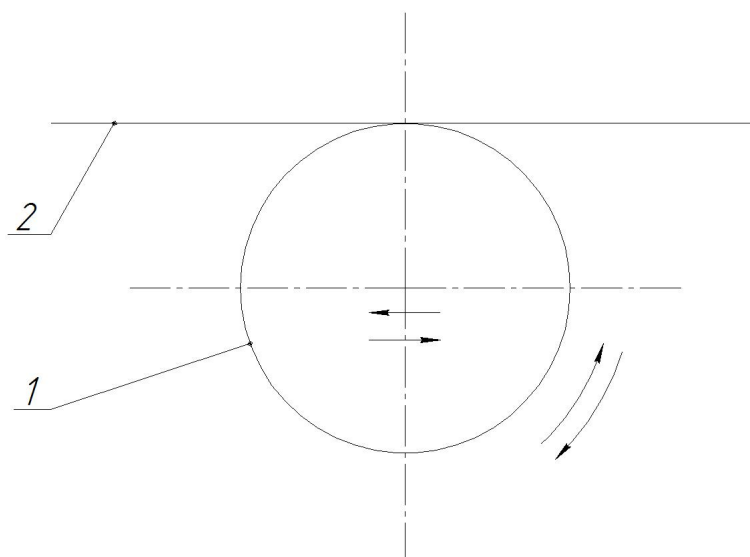
На рис. 2.3 зображено оброблюване циліндричне зубчасте колесо 1, з припуском на чистову обробку 2. Пропонований спосіб реалізується інструментом 3 за умови, що формоутворююча різальна кромка інструмента 3 знаходиться на продовженні радіусів кривизни 6 евольвентного профілю зубців оброблюваного колеса 1 так, що її початкова точка 4 описує при русі формоутворення обумовлений евольвентний профіль 5 зубця.



1 – оброблюване циліндричне зубчасте колесо; 2 - припуск на чистову обробку;
3 – інструмент; 6 - продовження радіусів кривизни евольвентного профілю зубців оброблюваного колеса. 4 - початкова точка; 5 - евольвентний профіль зубця.

Рисунок 2.3 – Схема обробки при контурному зубофрезеруванні.

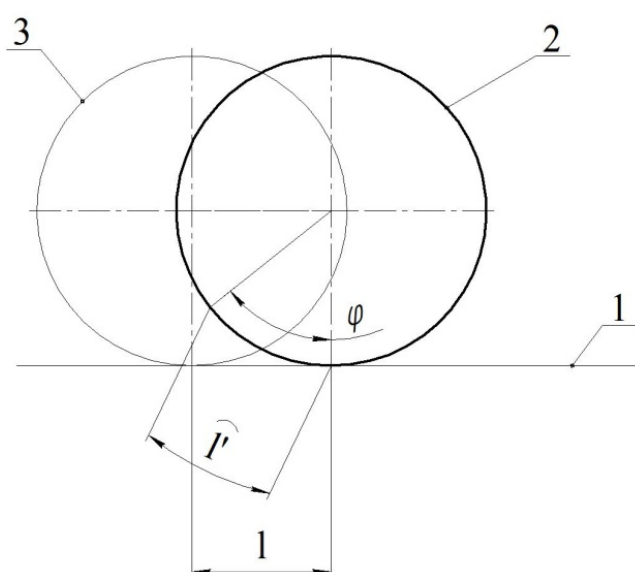
На рис. 2.4 зображено формоутворюючі рухи обкату циліндричного зубчастого колеса при обробці. Деталь здійснює формоутворюючий рух обкату, що складається з двох рухів, а саме: кочення без проковзування основної окружності 1 по прямій 2, дотичній до неї та обертання навколо власної вісі. В той же час, формоутворюючий рух обкату являється періодичним, повторюваним на кожному знову оброблюваному однойменному евольвентному профілю зубця циліндричного зубчастого колеса.



1 – основна окружність; 2 – дотична пряма до основної окружності.

Рисунок 2.4 – Формоутворюючі рухи обкату.

На рис. 2.5 зображено поворот циліндричного зубчастого колеса на один кутовий крок після обробки евольвентної поверхні зубця. Цикл обробки евольвентних поверхонь здійснюється при повороті зубчастого колеса на один кутовий крок φ по дузі основної окружності 2, одночасно з обкатом без ковзання обумовленої основної окружності 2 в положення 3 по прямій 1, дотичній їй, на величину лінійного кроку l рівного обумовленому кутовому l' , тобто: $l = l'$.



1 – дотична пряма до основної окружності; 2 – основна окружність; 3 – послідує положення основної окружності.

Рисунок 2.5 - Поворот циліндричного зубчастого колеса на один кутовий крок.

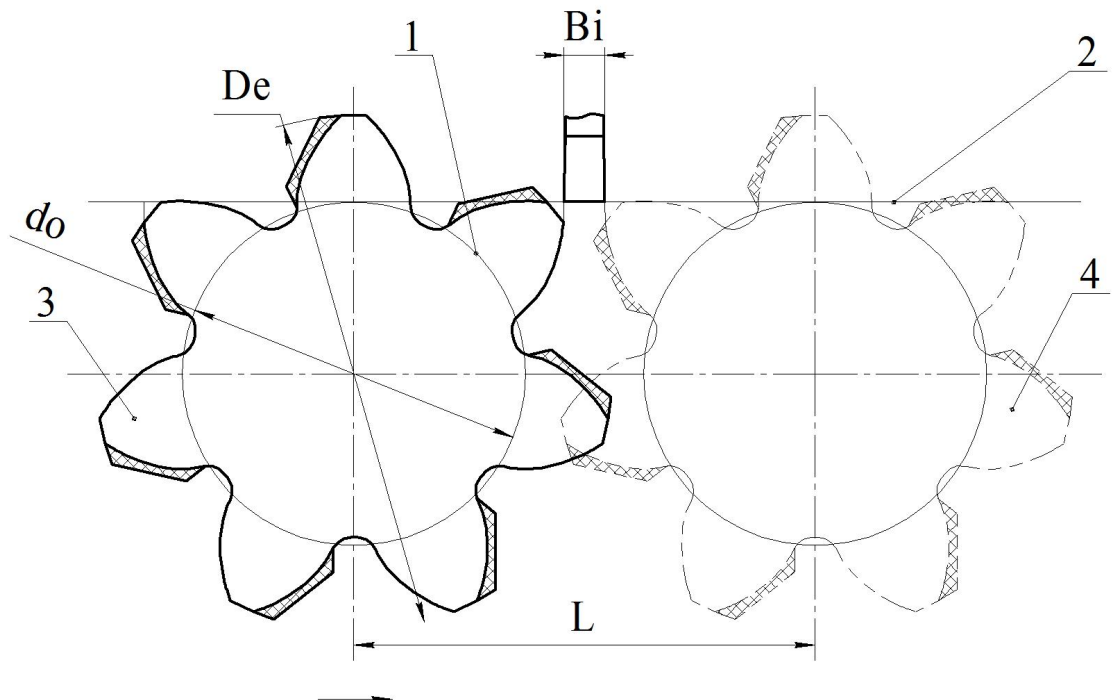
На рис. 2.6 зображено переміщення циліндричного зубчастого колеса після обробки всіх однойменних евольвентних поверхонь 3 для обробки протилежних необроблених евольвентних поверхонь 4. Рух відбувається по дотичній 2 основній окружності 1 без обертання на величину L , яка визначається з виразу:

$$L = De \cdot \sin(\cos^{-1} \frac{d_o}{De}) + B_i, \text{ мм};$$

де, De - діаметр вершин зубців, мм;

d_o - діаметр основної окружності, мм;

B_i - ширина різальної кромки інструмента, мм.



1 – основна окружність; 2 – дотична пряма до основної окружності; 3 – зубчасте колесо після обробки всіх однойменних евольвентних поверхонь; 4 - зубчасте колесо в положенні для обробки протилежних необроблених евольвентних поверхонь.

Рисунок 2.6 - Переміщення циліндричного зубчастого колеса.

Спосіб здійснюється наступним чином.

При зубофрезеруванні евольвентних поверхонь зубців циліндричного зубчастого колеса (рис. 2.3) інструмент 3, різальна кромка якого знаходиться на продовженні радіусів кривизни евольвентного профілю 6 встановлюють на безпечній відстані від оброблюваного зубчастого колеса. Потім

оброблюваному циліндричному зубчастому колесу надають відповідні формоутворюючі рухи обкату (рис. 2.4). Після завершення обробки евольвентного профілю одного зубця, оброблюване циліндричне зубчасте колесо здійснює рух ділення (рис. 2.5). По завершенню обробки однойменних евольвентних поверхонь всіх зубців, оброблюване циліндричне зубчасте колесо здійснює переміщення (рис. 2.6) для обробки опозитних необроблених евольвентних поверхонь зубців циліндричного зубчастого колеса.

2.4 Висновки

Головною перевагою запропонованого способу зубофрезерування евольвентних поверхонь зубців циліндричних зубчастих коліс є те, що інструмент має просту форму, сприятливі умови роботи з огляду на вільне стружкоутворення та можливість обробки широкої номенклатури типорозмірів циліндричних зубчастих коліс інструментом одного типорозміру.

Використання запропонованого способу зубообробки евольвентних поверхонь зубців циліндричних зубчастих коліс, за прогнозами, дозволить знизити собівартість обробки в 1,5...2,5 рази.

Здійснення запропонованого методу обробки можливе шляхом модернізації існуючих фрезерних верстатів. Для модернізації необхідно оснастити верстати системою ЧПУ з схемою синхронізації формоутворюючих рухів обкатування.

3 Конструювання верстата та його окремих модулів для реалізації зубообробки в умовах РПВС

3.1 Аналіз кінематики відомих верстатів

Запропонований у р. 2 метод обробки можливо здійснити шляхом модернізації існуючих фрезерних верстатів. Для модернізації необхідно оснастити універсальні фрезерні верстати системою ЧПУ з схемою синхронізації формоутворюючих рухів обкатування та спеціальною шпиндельною бабкою [14, 16].

На універсально-фрезерному верстаті 6Н80 можна фрезами різної форми фрезерувати площини, скоси, лиски, шліци, пази на невеликих деталях з різних матеріалів. Розмір робочої поверхні столу: 200х800 мм. Верстат консольного типу. Кінематичну схему наведено на рис. 3.1 [17].

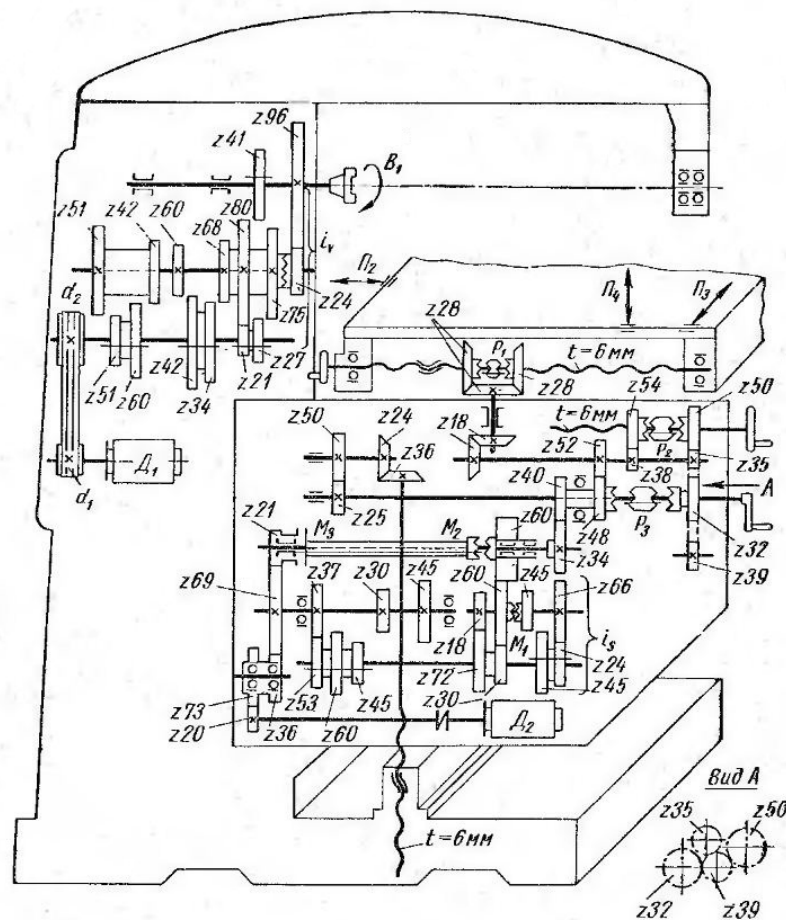


Рисунок 3.1 – Кінематична схема універсально-фрезерного верстата 6Н80.

Кінематична структура верстата [18] складається з декількох окремих структур. Кожна з цих структур складається з кінематичних груп для двох рухів: руху швидкості різання $\Phi_v(B_1)$ і руху подачі - поздовжньої $\Phi_{s1}(P_2)$, поперечної $\Phi_{s2}(P_3)$ або вертикальної $\Phi_{s3}(P_4)$.

Кінематична група руху швидкості різання $\Phi_v(B_1)$ - проста. Її внутрішній зв'язок складається з однієї кінематичної обертальної пари між шпинделем фрези і станиною. Зовнішній зв'язок передає рух від двигуна D_1 фрезерному шпинделю. Рух простий, із замкнутою траєкторією і він повинен налаштовуватися по двум параметрам: на швидкість - коробкою швидкостей (12 ступенів з діапазоном від 50 до 2240 обертів в хвилину шпинделя) і на напрямок – двигуном D_1 .

Кінематична група поздовжньої подачі $\Phi_{s1}(P_2)$ теж проста. Внутрішній зв'язок - у вигляді однієї поступальної кінематичної пари між столом і поперечними салазками. Зовнішній зв'язок розташована між двигуном D_2 і столом. Налаштування руху проводиться за чотирма параметрами: на швидкість - коробкою подач (12 ступенів з діапазоном від 25 до 1120 мм в хвилину), на напрямок - реверсом P_1 , на шлях і вихідне положення - упорами, встановленими на столі.

Структура кінематичних груп поперечної і вертикальної подач однотипна зі структурою групи поздовжньої подачі.

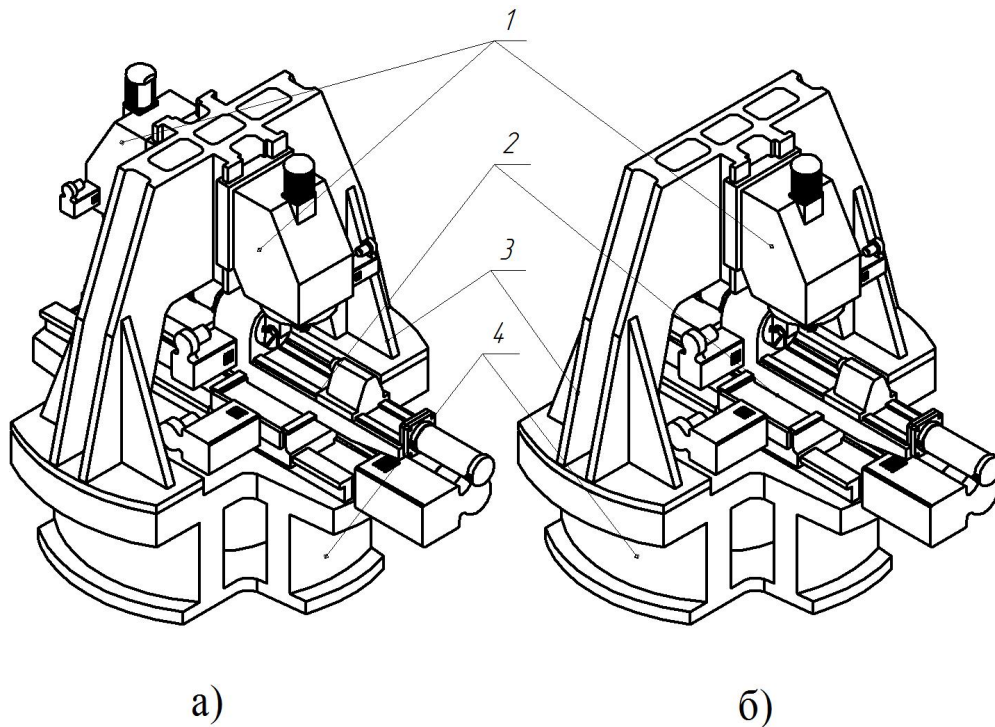
Всі рухи столу (поздовжній, поперечний і вертикальний) можна виконувати вручну або механічно з великою швидкістю для допоміжних переміщень. Для останньої мети в верстаті передбачений кінематичний ланцюг швидких ходів.

При включенні кулачковою муфти M_2 муфта M_3 розмикається і стіл буде переміщатися зі швидкістю робочої подачі. У широку шестерню z_{60} (права частина зубчастої муфти M_2) вмонтована запобіжна муфта від перевантажень ланцюгів подач.

3.2 Аналіз і синтез компоновки верстата для здійснення зубонарізання в умовах РПВС

В основу агрегатно-модульного принципу побудови верстатів закладена можливість на базі стандартних, нормальних чи уніфікованих вузлів компоувати технологічне обладнання та модулі будь-якого рівня спеціалізації та автоматизації з можливістю швидкого перекомпоновування його для випуску нової продукції [16].

Дві можливі компоновки верстата для здійснення зубонарізання в умовах РПВС наведені на рис. 3.2.



а) центр порталного типу двохсторонній; б) центр порталного типу односторонній.
1 – фрезерна шпіндельна коробка; 2 – хрестовий ділильний стіл; 3 – портал; 4 – основа.

Рисунок 3.2 - Компоновки верстата для здійснення зубонарізання в умовах РПВС.

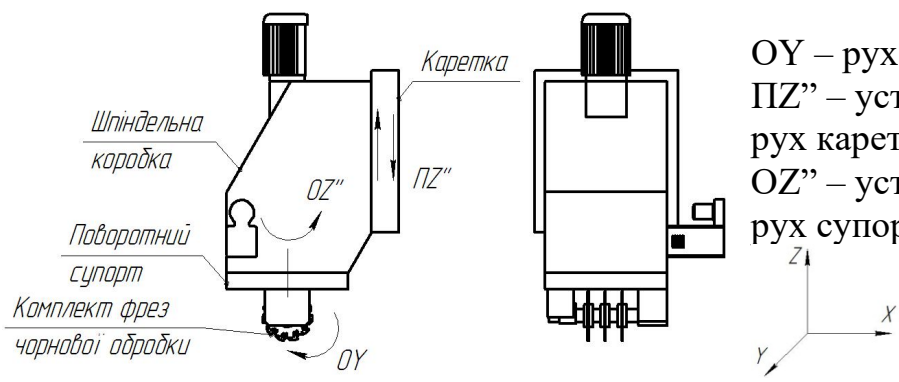
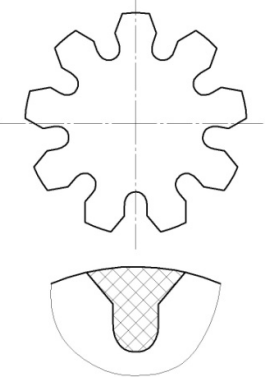
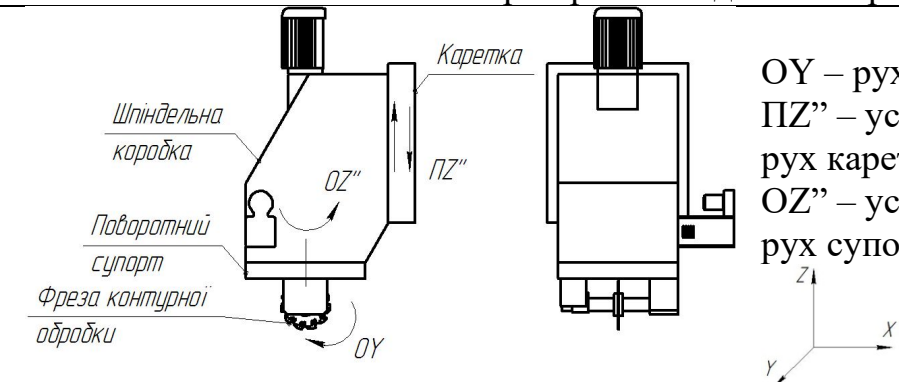
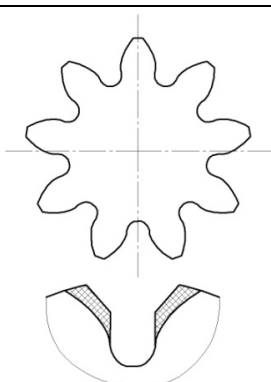
Визначальну роль при розмірній обробці заготовок грають траєкторії рухів формоутворення, від яких залежить найважливіший показник якості верстата - його точність [19]. Задані траєкторії формоутворюючих рухів і їх розташування в просторі забезпечуються виконавчими ланками і несучою

системою верстата. Сукупність виконавчих ланок і деталей несучої системи, яка характеризується їх кількістю, типом, просторовим розташуванням і пропорціями, називається компонованням верстата.

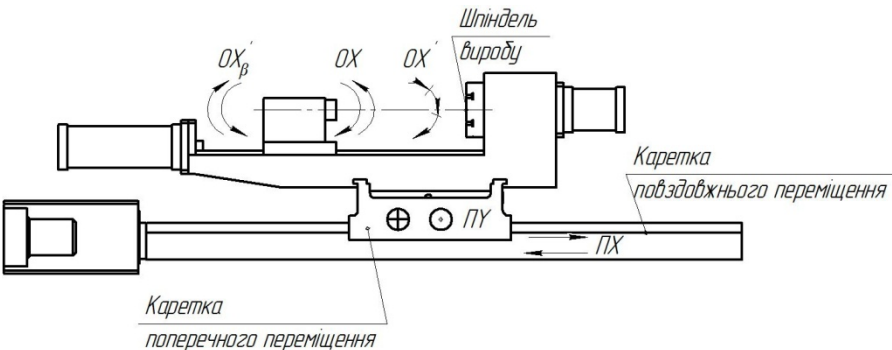
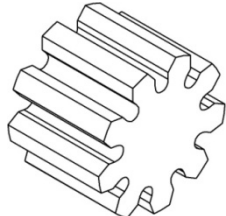
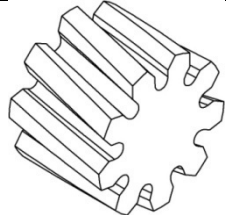
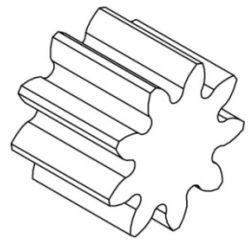
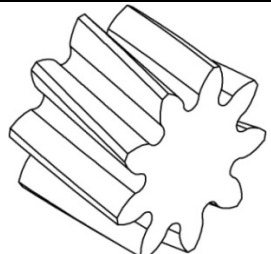
Компоновання верстата, як правило, складається з одного стаціонарного (постійно нерухомого) і декількох рухомих елементів, розділених стиками. Кожен рухливий елемент компоновання виконує один певний координатний рух, переміщаючись по напрямних рухомого стику.

Аналіз компоновок верстатів для здійснення зубонарізання в умовах РПВС наведено в таблиці 3.1(двохсторонній) та таблиці 3.2(односторонній).

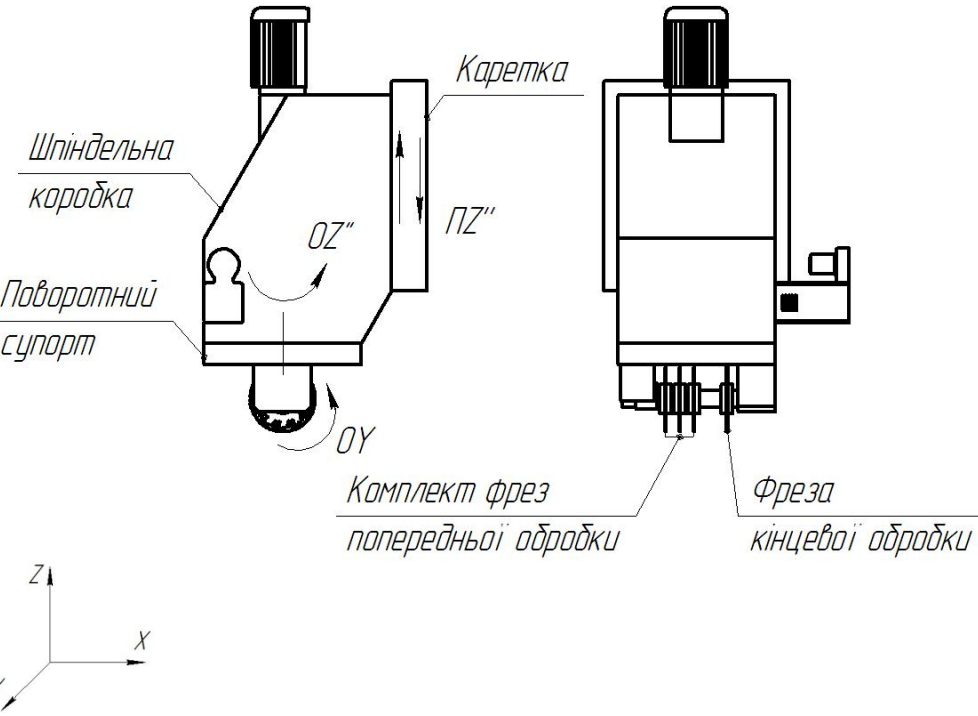
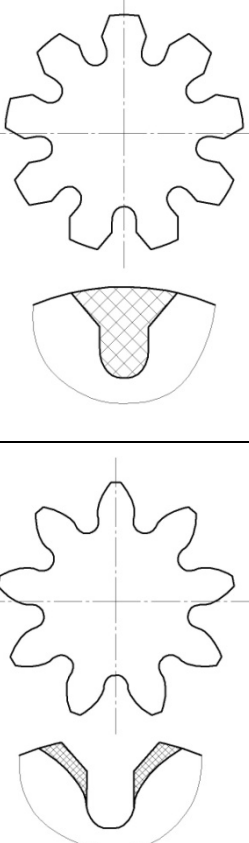
Таблиця 3.1 - Класифікація модулів для зубообробного центру порталного типу двохстороннього.

Схема модуля	Функційні параметри модуля (рівняння суми рухів $\sum P \dots$)	Виконавчі параметри модуля
Фрезерна шпіндельна коробка (ФШК) для попереднього прорізання зубців		
 Шпіндельна коробка Поворотний супорт Комплект фрез чорнової обробки Каретка ПЗ" OY OZ" Y Z X OY – рух різання; ПЗ" – установчий рух каретки; OZ" – установчий рух супорта.	для $\beta=0$: $\sum P_{\text{ФШК}} = \text{ПЗ}'' + \text{OZ}'' + \text{OY}$ для $\beta>0$: $\sum P_{\text{ФШК}} = \text{ПЗ}'' + \text{OY}$	
Фрезерна шпіндельна коробка для кінцевого прорізання зубців		
 Шпіндельна коробка Поворотний супорт Фреза контурної обробки Каретка ПЗ" OY OZ" Y Z X OY – рух різання; ПЗ" – установчий рух каретки; OZ" – установчий рух супорта.	для $\beta=0$: $\sum P_{\text{ФШК}} = \text{ПЗ}'' + \text{OZ}'' + \text{OY}$ для $\beta>0$: $\sum P_{\text{ФШК}} = \text{ПЗ}'' + \text{OY}$	

Продовження таблиці 3.1.

Схема модуля	Функційні параметри модуля (рівняння суми рухів $\sum P \dots$)	Виконавчі параметри модуля
Хрестовий ділильний стіл		
 OX' – дискретний рух ділення; OX – рух ділення; OX'_{β} – рух додаткового ділення, який враховує гвинтову поверхню; $ПХ$ – рух формоутворення повздож вісі; $ПҮ$ – рух формоутворення в поперечному перерізі.	для $\beta=0$:	
	для $\beta>0$:	
	для $\beta=0$:	
	для $\beta>0$:	

Таблиця 3.2 - Класифікація модулів для зубообробного центру порталного типу одностороннього.

Схема модуля	Функційні параметри модуля (рівняння суми рухів $\sum P \dots$)	Виконавчі параметри модуля
Фрезерна шпіндельна коробка (ФШК) для прорізання зубців		
 Шпіндельна коробка Поворотний супорт Каретка OZ'' PZ'' OY Комплект фрез попередньої обробки Фреза кінцевої обробки Z X Y OY – рух різання; PZ'' – установчий рух каретки; OZ'' – установчий рух супорта.	для $\beta=0$: $\sum P_{ФШК} = PZ'' + OZ'' + OY$ для $\beta>0$: $\sum P_{ФШК} = PZ'' + OY$ для $\beta=0$: $\sum P_{ФШК} = PZ'' + OZ'' + OY$ для $\beta>0$: $\sum P_{ФШК} = PZ'' + OY$	

Продовження таблиці 3.2.

Схема модуля	Функційні параметри модуля (рівняння суми рухів $\sum P \dots$)	Виконавчі параметри модуля
Хрестовий ділильний стіл		
OX' – дискретний рух ділення; OX – рух ділення; OX'_{β} – рух додаткового ділення, який враховує гвинтову поверхню; PX – рух формоутворення повздовж вісі; PX'' – установчий рух повздовж вісі; PY – рух формоутворення в поперечному перерізі; PY'' – установчий рух в поперечному перерізі.	для $\beta=0$: $\sum P_D = OX' + PX$	
	для $\beta>0$: $\sum P_D = PX'' + OX' + PX + OX'_{\beta}$	
	для $\beta=0$: $\sum P_D = PY'' + OX' + OX + PY + PX$ ($OX + PY$) - рух обкату	
	для $\beta>0$: $\sum P_D = PY + PX + OX' + OX + PY + PX + OX'_{\beta}$ ($OX + PY$) - рух обкату	

3.3 Кінематика верстата для здійснення обробки в умовах РПВС

Кінематику верстата слід розглянути помодульно, тобто кінематику фрезерної шпindelної коробки та кінематику хрестового ділильного стола.

Кінематична схема фрезерної головки представлена на рис. 3.2.

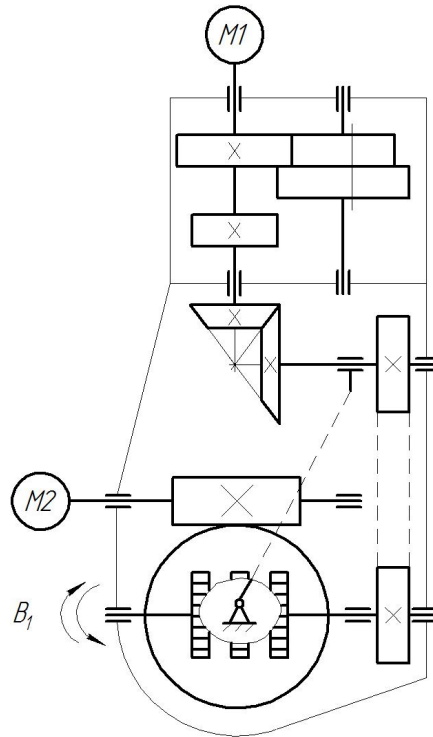


Рисунок 3.2 – Кінематична схема фрезерної головки верстата для здійснення обробки в умовах РПВС

Фрезерна головка має два двигуни – M1 та M2, які забезпечують необхідні параметри робочих та допоміжних рухів. Зокрема двигун M2 призначений для установки фрезерної оправки на необхідний кут підйому гвинтової лінії, при обробці косозубих зубчастих коліс. В свою чергу, двигун M1 призначений для виконання головного руху різання – обертання фрез, встановлених на фрезерній оправці.

Кінематична схема хрестового стола представлена на рис. 3.3.

Хрестовий ділильний стіл складається з повздовжніх П₃ та поперечних П₂ напрямних і ділильної головки В₂. Забезпечення усіх необхідних для реалізації гнучкої технології зубообробки рухів (установчі рухи, рухи

безперервного ділення, рух одиничного ділення, вісєва подача) виконується за рахунок перелічених модулів.

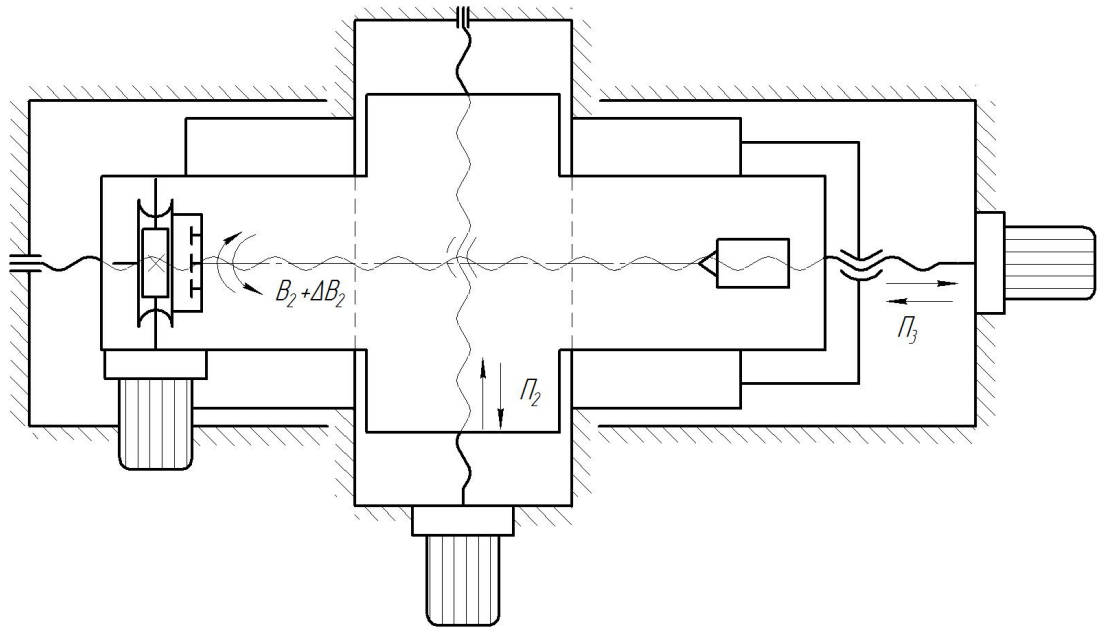


Рисунок 3.3 – Кінематична схема хрестового стола верстата для здійснення обробки в умовах РПВС

3.4 Конструкція верстата та його окремих модулів

Конструкція **фрезерних супортів** зубофрезерних верстатів в значній мірі визначає продуктивність обробки, а також якість і точність оброблених зубчастих коліс [20].

Циліндрична передача, у приводі фрезерного шпінделя, дає можливість реалізувати високі швидкості різання, але більшою мірою передає ударні навантаження від різання в кінематичний ланцюг привода, володіє меншими демпфувальними властивостями [21]. Для зменшення впливу бічного зазору в передачі на процес різання, використовують різні конструктивні рішення. Косозубі привідні колеса виконуються, наприклад, складеним. Бічний зазор в зачепленні встановлюється і регулюється зближенням вінців шляхом шліфування компенсаторного кільця, розташованого між ними. Для підвищення плавності обертання на маточині приводного колеса

розташовують гальмівний пристрій з регульованим залежно від характеру обробки гальмівним моментом.

Конструкцію фрезерної бабки [17] представлено на рис. 3.4.

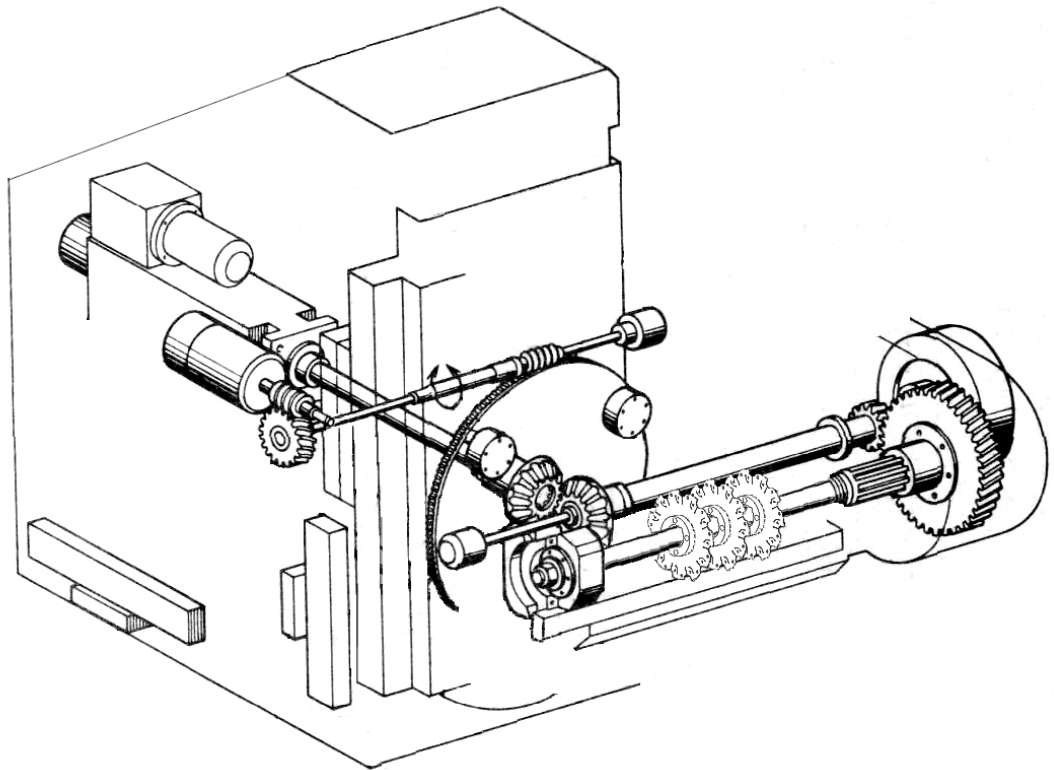


Рисунок 3.4 – Конструкція фрезерної бабки.

Конструкцію фрезерного супорта [17] показано на рис. 3.5.

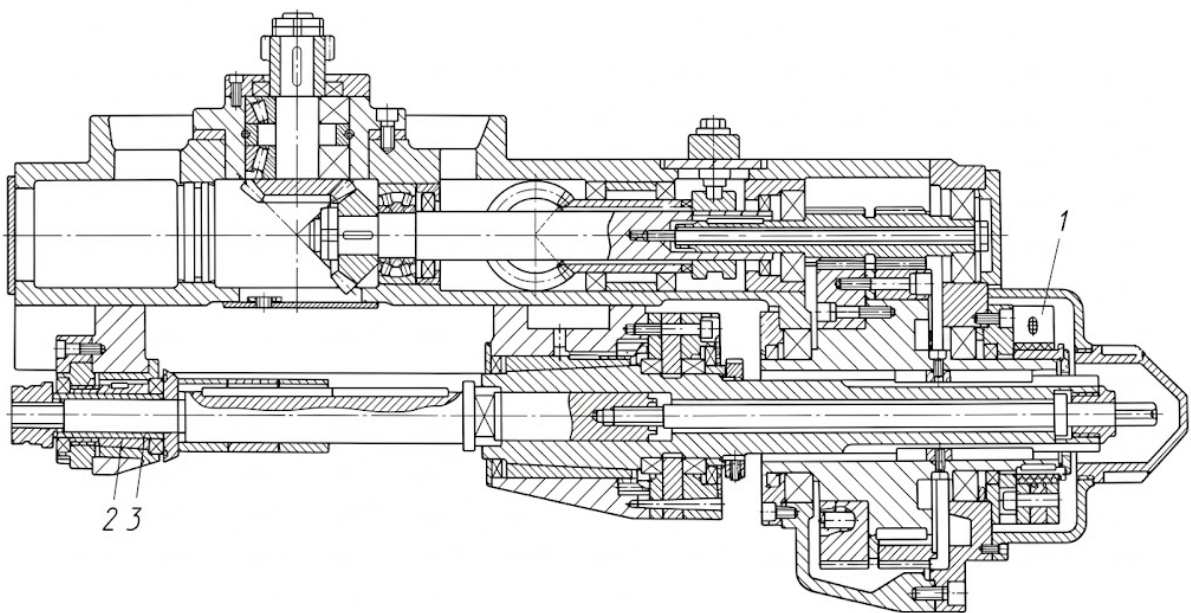


Рисунок 3.5 – Конструкція фрезерного супорта.

Хрестовий дільний стіл верстата для РПВС складеться з шпиндельної бабки та хрестових кареток.

У горизонтальних зубофрезерних верстатах функції підтримування оброблюваних деталей виконують шпиндельні бабки [19]. Тому експлуатаційні якості цих верстатів в значній мірі визначаються конструкцією останніх, точністю обертання і жорсткістю їх шпінделів, що сприймають частину маси оброблюваного колеса і повідомляють йому обертання. Найбільш істотним з точки зору забезпечення точності є вибір місця розташування дільного черв'ячного колеса на шпинделі.

Конструкція шпиндельної бабки представлена на рис. 3.6.

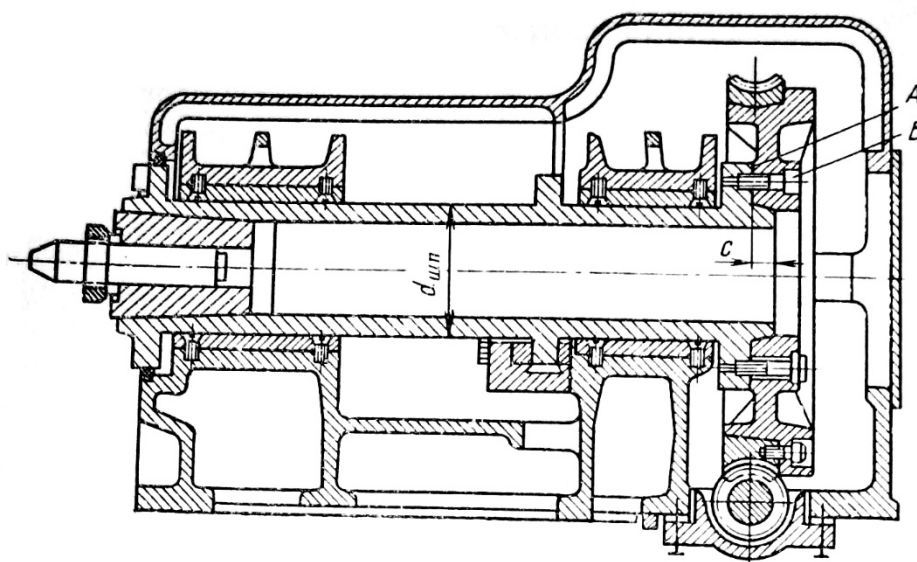


Рисунок 3.6 – Конструкція шпиндельної бабки.

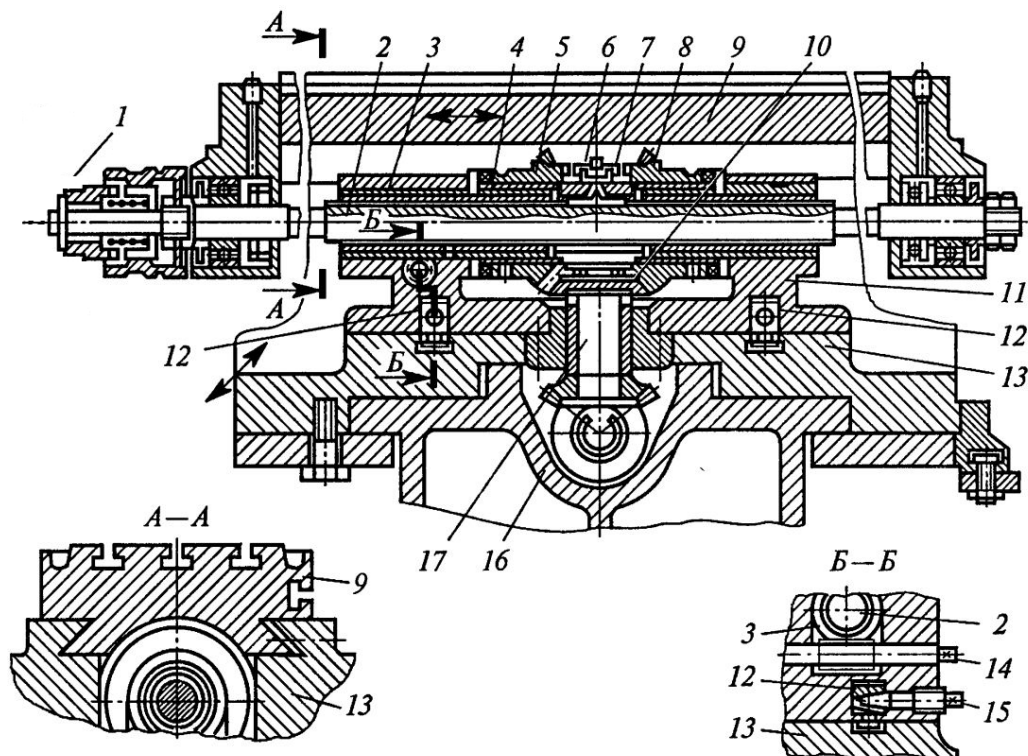
У більшості горизонтальних зубофрезерних верстатів дільне колесо розташовують консольно за заднім підшипником шпинделя (рис. 3.6). У цьому випадку його діаметр конструктивно не обмежений і може бути більше діаметра нарізованого колеса; зручний монтаж і вивірення черв'яка; легко забезпечується можливість спостереження за дільною парою і її регулювання. Жорсткість шпинделя забезпечується внаслідок великого його діаметра, що досягає половини діаметра оброблюваного колеса.

Істотним елементом конструкції бабок є спосіб з'єднання шпинделя з планшайбою і дільним колесом. Порівняно висока жорсткість досягається

при закріпленні маточини колеса на фланцевому опорному торці шпинделя (рис. 3.6). Центрування колеса здійснюють коротким конічним з кутом $7-10^\circ$ буртиком С, з попереднім натягом. Величину натягу встановлюють за рахунок зазору $0,1 \dots 0,15$ мм по торцю А. Зазор вибирають, затягуючи гвинти Б. Монтаж планшайби на передньому кінці шпинделя здійснюють звичайно таким же чином. Посадка колеса або планшайби на конус великої довжини з досить високою точністю пригону сполучених поверхонь технологічно важко реалізувати і має меншу жорсткість в порівнянні із закріпленням на фланці великого діаметру.

Опори шпинделів повинні задовольняти тим самим вимогам, що і напрямні столів вертикальних верстатів, тобто забезпечувати високу точність і плавність обертання шпинделя в широкому діапазоні швидкостей і навантажень, тривале збереження точності, високі демпфуючі властивості.

Конструкція хрестових кареток [19] показана на рис. 3.7.



1 – вхідний вал; 2 - ходовий гвинт; 3, 4 - гайки; 5, 8 і 10 - зубчасті колеса; 6 - вилка;
7 - муфта; 9 - стіл; 11 - поворотна плита; 12 - сухарі; 13 - салазки; 14 - черв'як; 15 - гвинти;
16 - консоль; 17 - вал

Рисунок 3.7 – Хрестові каретки стола

Салазки 13 верстата переміщаються на консолі 16 в поперечному напрямку. На салазках змонтований стіл 9, що переміщається ходовим гвинтом 2. Реверс столу здійснюють, переміщаючи вилкою 6 муфту 7 вправо і вліво, а для відключення руху столу необхідно вилку 6 встановити в середнє положення. У крайніх положеннях муфта з'єднується з конічними зубчастими колесами 5 і 8. На ходовому гвинті передбачений механізм вибірки зазору між різьбленням гвинта 2 і гайками 3 і 4, з яких одна (3) може переміщатися в осьовому напрямку при обертанні черв'яка 14 (див. розріз Б-Б). Подача стола здійснюється при обертанні вала 1.

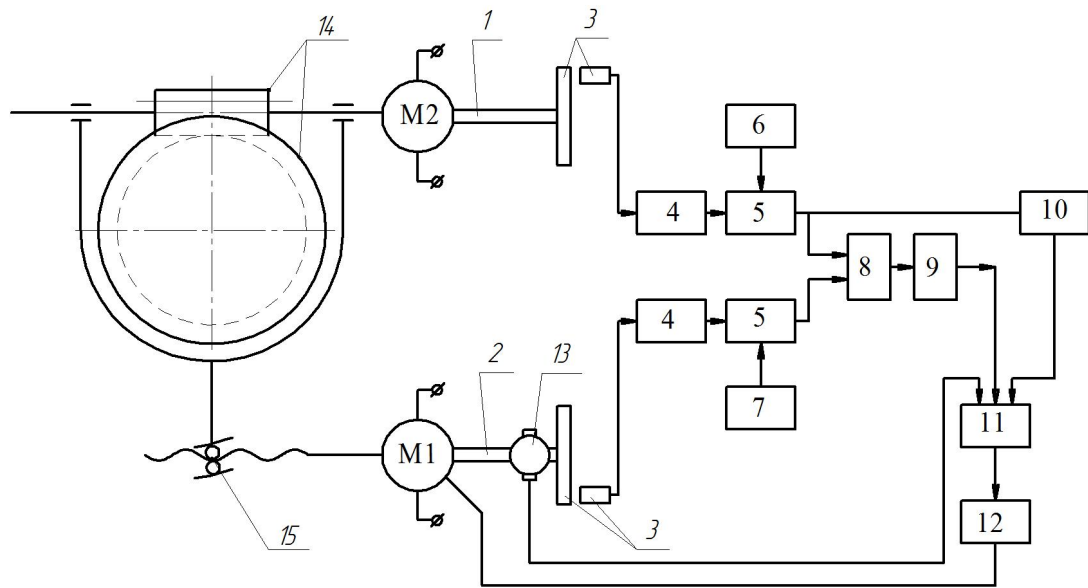
Плиту 11 центрують по Т-подібному пазу салазок 13 при допомозі двох сухарів 12, які одночасно служать для закріплення плити на салазках при їх підйомі.

3.5 Забезпечення синхронності руху електродвигунів

Синхронність рухів крокових електродвигунів забезпечується завдяки системі синхронізації [14, 16]. Блок-схема електронної системи синхронізації руху крокових двигунів показана на рис. 3.8.

Система електронної синхронізації руху призначена для синхронізації обертання двигунів M1 і M2. Роздільна здатність вимірювальної системи рівна 0,1 мкм, яка забезпечується при діленні вимірювального інтервалу 10 мкм на 100 частин. Частота синусних сигналів на виході електронних блоків 4 пропорційна вузловій швидкості вала. Ці сигнали подаються на входи лічильників 5. Необхідне передавальне відношення встановлюється блоками завдання коефіцієнтів 6, 7. Цифровий сигнал помилки на виході фазового дискримінатора 8 перетворюється в аналоговий за допомогою цифро-аналогового перетворювача 9, який використовується для керування двигуном кульково-гвинтової передачі. Якщо вал черв'ячної передачі обертається з частотою обертання, рівній n об/хв, то частота обертання ведучого вала кульково-гвинтової передачі визначається співвідношенням Vn/A , об/хв (де A , V

- коефіцієнти, що визначають частоти обертання валів черв'ячної і кульково-гвинтової передачі).



1 - ведучий вал черв'ячної передачі; 2 - ведучий вал кульково-гвинтової передачі; 3 - оптичний вимірювальний перетворювач; 4 - блок електронного перетворювача; 5 - лічильник імпульсів; 6 - блок завдання коефіцієнта А; 7 - блок завдання коефіцієнта В; 8 - фазовий дискримінатор; 9 - цифро-аналоговий перетворювач; 10 - блок завдання подачі; 11 - сумуючий блок; 12 - підсилювач потужності; 13 - тахогенератор; 14 - черв'ячна передача; 15 - кульково-гвинтова передача.

Рисунок 3.8 – Блок-схема електронної системи синхронізації руху крокових двигунів.

3.6 Висновки

У розділі приведено аналіз та синтез конструкції верстата для здійснення обробки в умовах РПВС. У пропонованого верстата відсутній кінематичний зв'язок між рухом різання і рухом обкочування, що дає наступні переваги:

1. Спрощується конструкція верстату та інструменту та знижується трудомісткість його виготовлення.
2. Можливість забезпечити максимальну продуктивну швидкість різання.
3. Спрощується кінематична структура зубообробного обладнання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи було досліджено та проаналізовано технологію обробки зубців шестерень методом черв'ячного зубофрезерування. Враховуючи відомі недоліки технології, запропоновано реалізувати технологію зубофрезерування на принципово нових засадах.

Розроблена концепція гнучкої технології обробки шестерень в умовах розділення процесу та вільного стружкоутворення, яка має ряд переваг:

- зниження витрат на інструмент $\approx$ в 10 разів, у тому числі зниження номенклатури інструменту;
- підвищення точності обробки поверхонь зубів за рахунок зниження сил різання в 2,5 ... 3 рази;
- підвищення ресурсу зуборізного обладнання;
- зниження напруги у поверхневому шарі зубців і як наслідок зменшення термічних деформацій і підвищення точності;
- поділ операцій чорнової і чистової обробки, що забезпечить підвищення стабільності параметрів точності;
- підвищення продуктивності обробки з одиниці площі, займаної зуборізним обладнанням $\approx$ в 1,5 ... 2 рази.

Для реалізації запропонованої технології, розроблено концепцію верстата - зубообробного центру з ЧПУ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гідроприводи та гідропневмоавтоматика: Підручник / В. О. Федорець, М. Н. Педченко, В. Б. Струтинський та ін. ; За ред. В. О. Федорця. – Київ: Вища школа, 1995. – 463 с.
2. Шестеренна гідромашина [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Шестеренна_гідромашина.
3. Кваліфікаційна робота за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти : метод. рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти спец. 131 «Прикладна механіка» / уклад. : К. Щербина, В. Шмельов, О. Скрипник, А. Гречка, О. Кузик ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. Кропивницький : ЦНТУ, 2024. 16 с.
4. Кваліфікаційна робота за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти : метод. рекомендації з оформлення кваліфікаційної роботи : спец. 131 «Прикладна механіка» / уклад. : В. А. Мажара, А. І. Гречка, В. В. Свяцький та ін. ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. Кропивницький : ЦНТУ, 2024. 40 с.
5. Методичні рекомендації до кваліфікаційної роботи / Укл.: І.І. Павленко, В.А. Мажара, К.К. Щербина, О.І. Скібінський. – Кроп-цький: ЦНТУ, 2021 – 42 с.
6. Бондаренко С.Г. Основи технології машинобудування, – Львів: Магнолія, 2006.
7. New Developments in Gear Hobbing / Dr. Oliver Winkel // Gear Technology. – 2010. – March/April. – P. 45–52.
8. Родін П. Р. Металорізальні інструменти : навч. посіб. Київ : Вища шк., 2005. 412 с.
9. Грабченко А. І., Федорович Є. М. Теорія різання : навч. посіб. Харків : НТУ «ХП», 2010. 320 с.
10. Криворучко Д. В., Залога В. О. Теорія різання матеріалів : підручник. Суми : Університетська книга, 2012. 513 с.
11. Родін П. Р. Основи теорії різання матеріалів : підручник. 2-ге вид.,

переробл. і доповн. Київ : Вища шк., 2005. 380 с.

12. Кальченко В. В., Кальченко О. В. Зубообробні верстати та інструменти : навч. посіб. Чернігів : ЧДТУ, 2015. 244 с.

13. Кондратюк Е. В. Проектування та виробництво зуборізного інструменту : навч. посіб. Житомир : ЖДТУ, 2010. 156 с.

14. Громнюк, С.І. (2014). Розширення технологічних можливостей універсальних зубофрезерних верстатів введенням керованого приводу головного руху. *Technology Audit and Production Reserves*, 5(3(19), 23–27.

15. Пат. 84471 Україна, МПК В23F 19/00. Спосіб лезової обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс після попереднього прорізання впадин. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р., Скібінський О.І.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № u 2013 04277; заявл. 05.04.2013; опубл. 25.10.2013. Бюл. №20.

16. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: у 3-х част. Частина І. Принципи побудови агрегатно-модульного технологічного обладнання. Під ред. Ю.М. Кузнецова. Навч. Посібник для ВНЗ. – Кіровоград, 2003. – 422с., іл.

17. Кузнецов Ю. М. Металорізальні верстати : підручник. Київ : ТОВ «Гнозіс», 2011. 452 с.

18. Федоренко І. Я. Металорізальні верстати : навч. посіб. Житомир : ЖДТУ, 2011. 360 с.

19. Бочков В.М. Сілін Р.І, Гаврильченко О.В. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів : Підручник / За ред. Сіліна Р.І. – Львів : Видавництво «Бескид Біт», 2008. – 448 с.

20. LIEBHERR - Gear hobbing machines [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.liebherr.com/en-us/gear-technology-and-automation-systems/gear-technique/gear-cutting-machines/gear-hobbing-machines/gear-hobbing-machines-4388726>.

21. Пуховський Є. С., Головка Д. Б. Металорізальні верстати та автоматизоване обладнання : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 324 с.