

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

на тему:

«Визначення раціональних параметрів інструментальної рейки черв'ячної фрези
з урахуванням рівномірного припуску при обробці»
«Determining rational parameters of the worm milling cutter tool rail, taking into
account uniform allowances during processing»

Виконавець: здобувач вищої освіти 2
року магістратури, групи ГМ-24М-3,
напряму 133 «Галузеве
машинобудування»

Максим Фундерат

Керівник: доц., к.т.н.

Антон АПАРАКІН

Рецензент: доц., к.т.н.

Тимофій РУДЕНКО

Завідувач кафедри: доц., к.т.н.

Андрій ГРЕЧКА

Центральноукраїнський національний технічний університет	
Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	133 Галузеве машинобудування
Освітньо-наукова програма	Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММР
_____ Андрій ГРЕЧКА

«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА
Максима ФУНДЕРАТА

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Визначення раціональних параметрів інструментальної рейки черв'ячної фрези з урахуванням рівномірного припуску при обробці

2. Керівник роботи: к.т.н., доц., Антон АПАРАКІН

3. Строк подання роботи до захисту «10» травня 2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є: розробка процесу формоутворення черв'ячних коліс з урахуванням рівномірного припуску при обробці спеціальними черв'ячними фрезами, який розраховано на основі розробленої узагальненої математичної моделі теоретичного формоутворення плоских систем зубчастих зачеплень.

Завдання:

- розробити математичний опис вихідних формоутворюючих профілів;
- розробити математичну модель процесу формоутворення черв'ячних коліс з урахуванням рівномірного припуску при обробці;
- визначити раціональні параметри інструментальної рейки черв'ячної фрези з урахуванням рівномірного припуску при обробці;
- виконати економічне обґрунтування ефективності використання розробленої черв'ячної фрези.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1	ВСТУП	Січень 2026	Вик.
2	АНАЛІЗ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЧЕРВ'ЯЧНИХ КОЛІС	Лютий 2026	Вик.
3	МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕОРЕТИЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ЧЕРВ'ЯЧНИХ КОЛІС	Лютий 2026	Вик.
4	МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	Березень 2026	Вик.
5	РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ РЕЙКИ ЧЕРВ'ЯЧНОЇ ФРЕЗИ З УРАХУВАННЯМ РІВНОМІРНОГО ПРИПУСКУ ПРИ ОБРОБЦІ	Березень 2026	Вик.
6	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ	Квітень 2026	Вик.
7	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	Квітень 2026	Вик.
8	ГРАФІЧНА ЧАСТИНА ТА ОФОРМЛЕННЯ	Травень 2026	Вик.

Дата видачі завдання « 19 » січня 2026 р.

Керівник роботи _____ Антон АПАРАКІН
(підпис)

Завдання прийнято до виконання 19 » січня 2026 р.

Здобувач _____ Максим ФУНДЕРАТ
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Максим ФУНДЕРАТ. Визначення раціональних параметрів інструментальної рейки черв'ячної фрези з урахуванням рівномірного припуску при обробці. Кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: ЦНТУ, 2026. – 67 с. Матеріали презентації 9 аркушів.

Метою роботи є розробка процесу формоутворення черв'ячних коліс з урахуванням рівномірного припуску при обробці спеціальними черв'ячними фрезами, який розраховано на основі розробленої узагальненої математичної моделі теоретичного формоутворення плоских систем зубчастих зачеплень.

Для досягнення мети дослідження було вирішено такі задачі: розробка математичного опису вихідних формоутворюючих профілів; розробка математичної моделі процесу формоутворення черв'ячних коліс з урахуванням рівномірного припуску при обробці; визначення раціональних параметрів інструментальної рейки черв'ячної фрези з урахуванням рівномірного припуску при обробці.

Актуальність: розробка технології формоутворення черв'ячних коліс спеціальними черв'ячними фрезами з урахуванням рівномірного припуску при обробці є актуальною і важливою задачею. Для вирішення цієї проблеми необхідно провести більш детальний аналіз існуючих способів формоутворення черв'ячних зубчастих передач та їх теоретичних передумов. Формоутворення черв'ячних коліс з урахуванням рівномірного припуску при обробці дозволяє забезпечити підвищення точності обробки.

Наукова новизна: удосконалено узагальнену кінематичну схему теоретичного формоутворення; розроблено математичну модель процесу формоутворення черв'ячних коліс з урахуванням рівномірного припуску при обробці; визначено раціональні параметри інструментальної рейки черв'ячної фрези з урахуванням рівномірного припуску при обробці.

Практичне значення: розроблено методику математичного опису вихідних формоутворюючих профілей, яка дозволяє проаналізувати послідовне формоутворення черв'ячного колеса черв'ячною фрезою з поділенням на три частини по висоті профілем інструментальної рейки; використання проектної фрези з оптимальним поділенням профілю рейки дозволить нарізати зубці черв'ячного колеса за один прохід, збільшивши, тим самим, продуктивність обробки більше, ніж у 1,5 рази, а також підвищити на один ступінь точність обробки.

Ключові слова: спеціальні черв'ячні фрези, інструментальна рейка, рівномірний припуск при обробці, ступінь точності обробки.

Abstract

Maksym FUNDERAT. Determining rational parameters of the worm milling cutter tool rail, taking into account uniform allowances during processing. Master's Thesis: CNTU, 2026. - 67 p. Presentation materials 9 il.

The aim of the work is to develop a worm gear generation process that takes into account a uniform machining allowance when using special worm hobs, calculated on the basis of the developed generalized mathematical model of the theoretical generation of planar gear meshing systems.

To achieve the goal of the study, the following tasks were solved: development of a mathematical description of the initial generating profiles; development of a mathematical model of the worm gear generation process considering a uniform machining allowance; determination of rational parameters of the tool rack of the worm hob considering a uniform machining allowance during machining.

Relevance: the development of a technology for generating worm gears using special worm hobs while considering a uniform machining allowance is an actual and important task. To solve this problem, it is necessary to conduct a more detailed analysis of existing methods for generating worm gear drives and their theoretical foundations. The generation of worm gears while considering a uniform machining allowance during machining makes it possible to improve machining accuracy.

Scientific novelty: the generalized kinematic theory of generation was improved; a mathematical model of the worm gear generation process considering a uniform machining allowance during machining was developed; rational parameters of the tool rack of the worm hob considering a uniform machining allowance during machining were determined.

Practical significance: a methodology for the mathematical description of the initial generating profiles was developed, allowing analysis of the sequential generation of a worm gear by a worm hob with a tool rack profile divided into three sections along its height; the use of a design hob with optimal division of the rack profile makes it possible to cut the worm gear teeth in a single pass, thereby increasing machining productivity by more than 1.5 times and improving machining accuracy by one grade.

Keywords: special worm hobs, tool rack, uniform machining allowance, machining accuracy grade.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА.....	9
1.1. Стан питання, мета та задачі дослідження.....	9
1.1.1. Аналіз формоутворення черв'ячних коліс.....	9
1.1.2. Математичні моделі теоретичного формоутворення черв'ячних коліс	16
1.1.3. Мета роботи та задачі дослідження.....	24
1.2. Методика теоретичних досліджень.....	25
1.2.1. Спосіб поділення профілю інструментальної рейки черв'ячної фрези	25
1.2.2. Методика математичного опису вихідних формоутворюючих профілей	27
1.3. Визначення раціональних параметрів інструментальної рейки черв'ячної фрези з урахуванням рівномірного припуску при обробці	32
1.4. Розробка конструкції інструментальної рейки черв'ячної фрези з урахуванням рівномірного припуску при обробці.....	47
РОЗДІЛ 2 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	48
2.1. Загальні вихідні дані	48
2.2. Визначення витрат на підготовку виробництва.....	50
2.3. Визначення витрат на виготовлення інструменту.....	51
2.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки).....	56
2.5. Розрахунок показників економічної ефективності.....	60
ВИСНОВКИ.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	65

ВСТУП

Черв'ячні передачі як складова частина більшості машин і механізмів є в той же час одними із самих масових, складних і трудомістких деталей в технології машинобудування. Важливими етапами життєвого циклу зубчастої передачі є теоретичне та технологічне формоутворення черв'ячних коліс. Оптимальне формоутворення черв'ячних коліс дозволить підвищити якість і знизити собівартість обробки, поліпшити експлуатаційні показники різних машин і механізмів, а також їх ремонтпридатність що є актуальною задачею. Це особливо важливо для черв'ячних коліс, що використовуються в механізмах машин підвищеної точності.

Разом з тим, як показав досвід, доцільним і економічно виправданим є формоутворення таких черв'ячних коліс з урахуванням рівномірного припуску при обробці.

Тому розробка технології формоутворення черв'ячних коліс спеціальними черв'ячними фрезами з урахуванням рівномірного припуску при обробці є актуальною і важливою задачею. Для вирішення цієї проблеми необхідно провести більш детальний аналіз існуючих способів формоутворення черв'ячних зубчастих передач та їх теоретичних передумов. Формоутворення черв'ячних коліс з урахуванням рівномірного припуску при обробці дозволяє забезпечити підвищення точності обробки.

Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розробка процесу формоутворення черв'ячних коліс з урахуванням рівномірного припуску при обробці спеціальними черв'ячними фрезами, який розраховано на основі розробленої узагальненої математичної моделі теоретичного формоутворення плоских систем зубчастих зачеплень.

Поставлена мета реалізована шляхом вирішення таких задач:

- розробка математичного опису вихідних формоутворюючих профілів;
- розробка математичної моделі процесу формоутворення черв'ячних коліс з урахуванням рівномірного припуску при обробці;

- визначення раціональних параметрів інструментальної рейки черв'ячної фрези з урахуванням рівномірного припуску при обробці.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процес формоутворення черв'ячних коліс. Предметом дослідження є аналіз і синтез процесу формоутворення черв'ячних коліс спеціальними черв'ячними фрезами з урахуванням рівномірного припуску при обробці.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконані на основі: теорії зубчастих зачеплень, теорії відображення афінного простору, теорії проектування різального інструменту на ПК, зокрема пакету прикладних программ Matcad, SolidWorks.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Удосконалено узагальнену кінематичну теоретичного формоутворення.
2. Розроблено математичну модель процесу формоутворення черв'ячних коліс з урахуванням рівномірного припуску при обробці;
3. Визначено раціональні параметри інструментальної рейки черв'ячної фрези з урахуванням рівномірного припуску при обробці.

РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

1.1. Стан питання, мета та задачі дослідження

1.1.1. Аналіз формоутворення черв'ячних коліс

При розробці нових способів формоутворення зубців черв'ячних коліс для черв'ячних передач необхідно використовувати нові технологічні способи.

Для підвищення точності обробки черв'ячного колеса використовують спосіб радіальної подачі з наступним профілюючим обкочуванням. Тобто, спочатку обробка йде найбільш продуктивним способом радіальної подачі, а при досягненні встановленої міжосьової відстані радіальна подача вими кається і проводиться обкочування черв'ячного колеса на повний оберт або декілька повних обертів [13].

При тангенціальній подачі черв'ячна фреза вгвинчується в заготовку, тому не відбувається зрізання робочого профілю зубців поблизу торців нарізованого черв'ячного колеса, яке може мати місце при радіальній подачі столу із заготовкою та збільшується точність обробки за рахунок зменшення огранки профілю [10].

В умовах змішаної подачі черв'ячне колесо оброблюється методом радіальної подачі, а при досягненні встановленої міжосьової відстані радіальна подача вимикається і вмикається тангенціальна подача. Тобто, спочатку обробка йде найбільш продуктивним способом радіальної подачі, а профілювання завершується найбільш точним способом тангенціальної подачі [11].

В процесі фрезерування зубців черв'ячного колеса тангенціальна подача забезпечує більшу кількість профілюючих різів інструменту, які забезпечують утворення бокової поверхні зуб'їв черв'ячного колеса. Чим менше тангенціальна подача, тим більше профілюючих різів фрези, тим менше огранка поверхні зуба нарізованого черв'ячного колеса [12]. Але точність цих способів недостатня.

Одним із методів підвищення точності зубообробки є зменшені навантаження в процесі обробки шляхом зміни схеми зрізання припуску.

В деяких випадках для підвищення точності у методі, який застосовується в роботі [5], використовують фрезу-летючку, яку оснащують додатковим зубцем, що має стандартний профіль, який розташовують у одній площині з зубцем модифікованого профілю. Для наближення поверхні різання за формою та розмірами до реальної поверхні перед різанням модифікованим зубцем стандартний зубець фрези частково відновлює форму та розміри перехідної поверхні. Проте, мінімальне число зубців черв'ячних фрез дорівнює дев'яти, тому поверхня різання, яку відтворюють у даному експерименті, суттєво відрізняється від реальної поверхні різання черв'ячної фрези, внаслідок чого даний метод містить методичну похибку.

У винаході [2] для розподілу припуску, який зрізає один зубець, між декількома вершинними лезами, на його поверхні утворено кілька стружкових різців малої глибини, а вершинні леза на кожному із різців мають різну висоту.

Підвищення продуктивності нарізання зубчастих коліс за рахунок використання багатозахідних черв'ячних фрез (із числом заходів до 4-х) забезпечується, незважаючи на зростання часу врізання й перебігу, завдяки збільшенню швидкості обточування та хвилинної подачі. Проте, це досягається скороченням кількості профілюючих різів та зниженням точності обробки внаслідок підвищення сили різання, пружних коливань і деформацій верстата. У свою чергу, щоб забезпечити при цьому необхідну точність треба збільшити на 30% зовнішній діаметр фрези та довести кількість стружкових канавок у стандартних фрез до 14 - 17, але виконання цих умов обмежують розміри робочого простору та недостатня для цього жорсткість зубофрезерних верстатів.

В цілому, можна констатувати, що основними недоліками наведених вище схем різання та конструкцій черв'ячних фрез є значна працемісткість виготовлення, збільшення затрат часу на переточування та складність у збереженні їх геометрії при переточуванні, що суттєво зменшує їх переваги. Зокрема при фактичному підвищенні періоду стійкості черв'ячних фрез з

прогресивною схемою різання на 12 – 15% витрати на виготовлення та підтримання працездатності цих фрез не компенсуються їх ефективністю. Крім того, у прогресивних фрез, як і у фрез з генераторною схемою різання загалом, погіршуються умови огинання та профілювання зубців коліс. Наприклад, при використанні черв'ячних фрез з десятима рейками, профілі формують лише п'ять повнопрофільних зубців на одному витку, внаслідок чого зростають похибки у виді підвищеного огранювання робочих поверхонь та збільшується припуск під чистову обробку.

Згідно з роботою [6] усунення або часткове зменшення негативного впливу на процес зубообробки факторів, присутніх у схемі різання черв'ячних фрез стандартної конструкції, можливе за рахунок збільшення кількості стружкових канавок і рейок. Це досягається при незмінному зовнішньому діаметрі фрези зменшенням висоти зубців та розділенням профілю рейки нормального початкового контуру по висоті між фрезами для двох послідовних проходів.

Але найбільш радикальне вирішення усіх означених проблем дає розділення по висоті профілю рейки початкового контуру черв'ячної фрези між інструментами для двох послідовних проходів. Черв'ячні фрези, які побудовані за даним принципом, представлено на рис. 1.1 [6].

З розділеного по висоті профілю рейки нормального початкового контуру 1 утворено фрезу для першого проходу, зубці 2 якої відповідають профілю ніжки зубців цієї рейки (рис. 1.1, а).

Фреза для другого проходу утворена як частина профілю нормального початкового контуру таким чином, що її зубці 3 відповідають головці зубців цього профілю (рис. 1.1, б). Для виключення підрізання евольвентних профілів, сформованих першою фрезою, ніжки 4 зубців другої фрези у нормальному перерізі не повинні виходити за межі нормального початкового контуру 1 і можуть мати довільну форму, яка відповідає вимогам технологічності, наприклад, виконану із більшим профільним кутом, або прямокутною в нормальному перерізі [6].

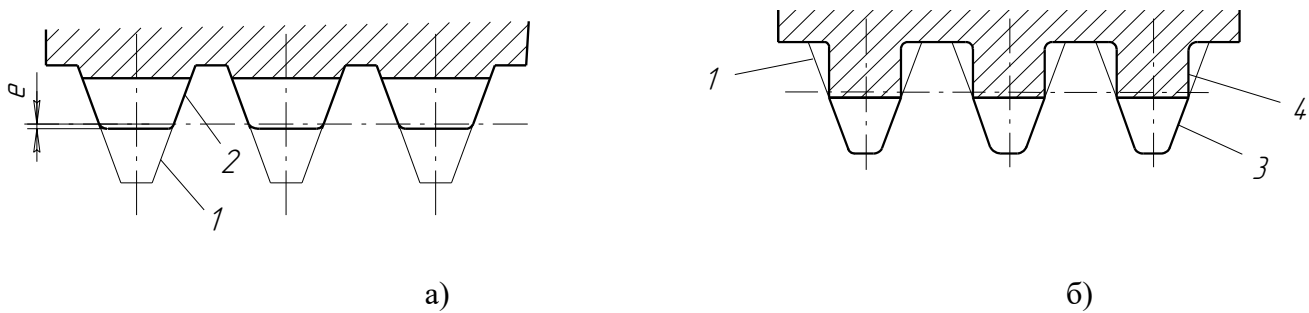


Рис. 1.1. Рейка черв'ячної фрези з поділеним контуром для першого (а) та другого (б) проходів:

- 1 - рейка нормального початкового контуру;
- 2 - зубці фрези для першого проходу;
- 3 - зубці фрези для другого проходу;
- 4 - ніжка зубців фрези для другого проходу.

Оскільки гвинтова поверхня основного черв'яка, на якій розміщено ніжки зубців другої фрези, має допоміжний характер і не приймає участі у різанні, її не розділяють стружковими канавками (рис. 1.1, б).

На першому проході усувається припуск, який міститься між ділильним і зовнішнім циліндрами заготовки та відбувається формування головок зубців колеса.

На другому проході зрізується припуск, що міститься між поверхнями ділильного циліндру та циліндру западин і формуються ніжки зубців колеса.

Для усунення перехідного сліду на поверхні утворених зубців на одній із фрез необхідно виконати перекриття по висоті зубців у межах $e=0,25-0,5m$ (рис. 1.1, а).

При такій будові фрез зберігаються закономірності формоутворення та профілювання в умовах обкочування, але відбувається перерозподіл припуску між першим та другим проходками та змінюється схема усунення металу із западин між зубцями колеса, яке нарізають (рис. 1.2) [8].

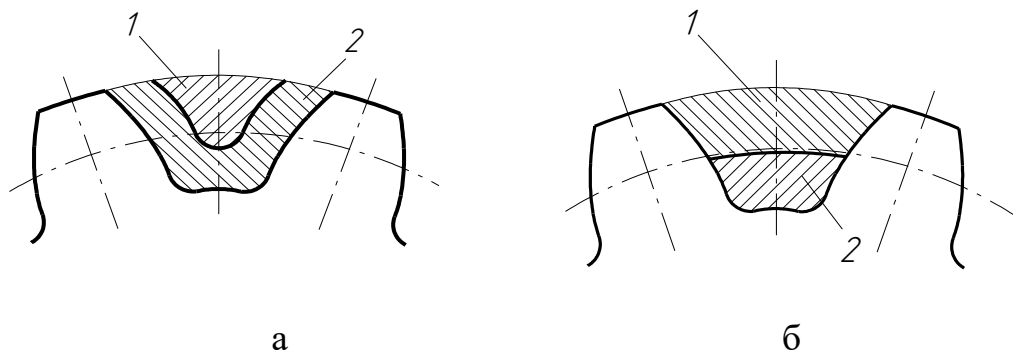
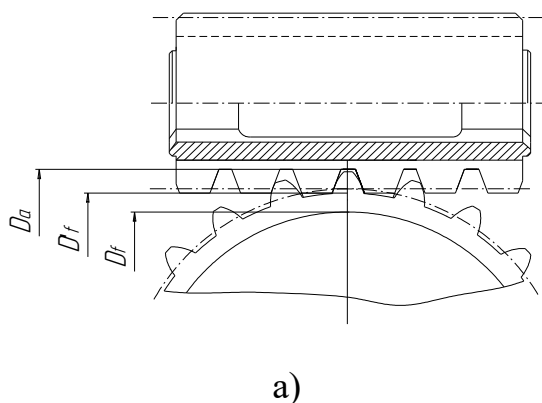


Рис. 1.2. Схема зрізання припуску та формування евольвентних профілів стандартною черв'ячною фрезою (а) та черв'ячною фрезою з поділеним профілем (б).

Основна перевага черв'ячних фрез з поділеним профілем початкового контуру (далі позначені фрези ” ПК „) полягає в тому, що при незмінному зовнішньому діаметрі фрези за рахунок зменшення висоти зубців можна утворити більшу кількість торцевих зубців (рейок) .

Це дозволяє розвантажити фрезу завдяки перерозподілу зрізуваних шарів між більшою кількістю зубців по колу, а також, при однаковій із стандартною черв'ячною фрезою подачі S_z на зуб, пропорційно зростанню кількості рейок збільшити осьову подачу та підвищити продуктивність зубонарізання.

На рис 1.3 показано схему формування зубців черв'ячними фрезами з поділеним профілем за два проходи [6].



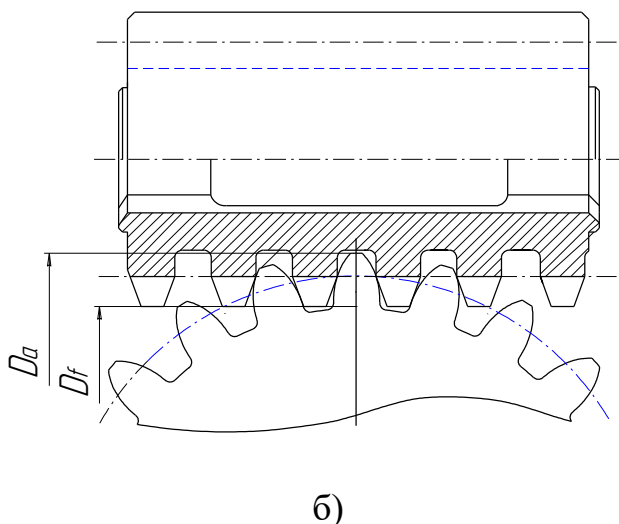
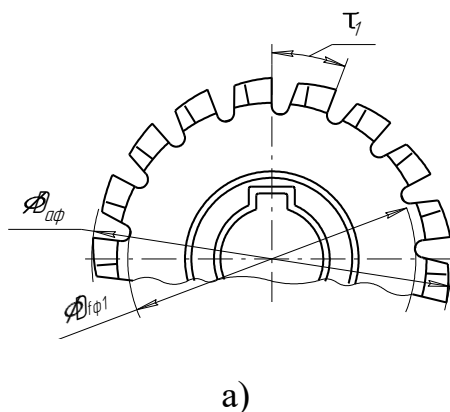
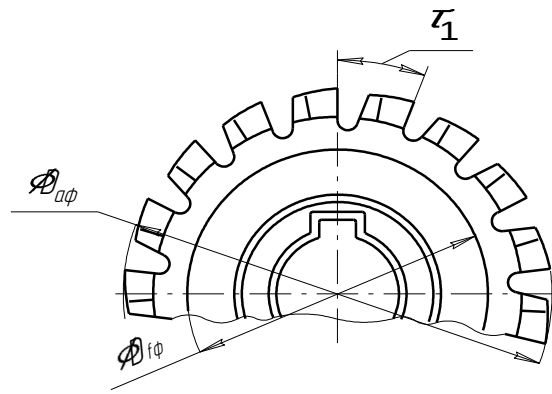


Рис. 1.3. Схема формування зубців у двопрхідному нарізанні зубчастого колеса черв'ячними фрезами з поділенням профілем.

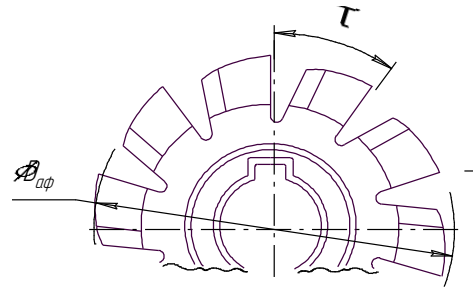
На рис.1.4 зображено вид з торця на стандартну черв'ячну фрезу, в якій $z_0=9$ (а), та фрези ПК для першого (б) і другого (в) проходів, у яких $z_0=16$ [9].

Відомий зубонарізний інструмент, що складається з двох черв'ячних фрез, внаслідок необхідності переналагодження зубофрезерного верстата на різні міжосьові відстані для першого і другого проходу має суттєвий недолік, що зменшує досягну точність обробки. Необхідність переналагодження суттєво збільшує трудомісткість процесу і вносить похибки у відносне положення першої та другої черв'ячної фрези, що потім впливає на точність оброблюваного зубчастого колеса.





б)



в)

Рис.1.4. Черв'ячні фрези з поділеним профілем для першого (а) та другого (б) проходів і стандартна черв'ячна фреза (в).

Проте відомий зубонарізний інструмент для двохперехідного нарізання циліндричних зубчастих коліс [18] має ряд суттєвих недоліків, які зменшують досяжну точність обробки. Тобто необхідність встановлення черв'ячної фрези для здійснення другого проходу не виключає можливості зміни її положення відносно черв'ячної фрези для першого проходу як шляхом повороту відносно вісі оправки, так і шляхом осьового зміщення. Затилування черв'ячних фрез для першого та другого проходу, а також їх переточування в процесі експлуатації виконується окремо з різних встановлювань. Застосування відомого зубонарізного інструменту для обробки черв'ячних коліс викличе зменшення кількості рейок (зубців на торці) внаслідок необхідності зменшення зовнішнього діаметра зубонарізного інструмента, оскільки черв'ячна фреза для обробки черв'ячного колеса повинна відповідати черв'яку з яким буде

зачеплюватись оброблюване черв'ячне колесо. Це зменшує досяжну точність обробки та підвищує трудомісткість обслуговування черв'ячних фрез в процесі експлуатації.

В роботі [5-9] представлено модифіковану фрезу з розділеного по висоті профілю рейки нормального початкового контуру для першого проходу, зубці якої відповідають профілю ніжки зубців цієї рейки, та фрезу для другого проходу яка утворена як частина профілю нормального початкового контуру таким чином, що її зубці відповідають головці цього профілю. Основна перевага черв'ячних фрез з розподіленим профілем початкового контуру полягає в тому, що при незмінному зовнішньому діаметрі фрези за рахунок зменшення висоти зубців можна утворити більшу кількість торцевих зубців (рейок). Це дозволяє розвантажити фрезу завдяки перерозподілу зрізуваних шарів між більшою кількістю зубців по колу, а також, при однаковій із стандартною черв'ячною фрезою подачі на зубець, пропорційно зростанню кількості рейок збільшити осьову подачу та підвищити продуктивність зубонарізання.

Таким чином, для підвищення точності механічної обробки черв'ячного колеса для черв'ячної передачі необхідно використати ідею поділення профілю інструментальної де ліквідовані недоліки, які пов'язані зі зміною фрези при розділенні припуску в процесі обробки та ліквідовані похибки при роздільному затилуванні.

Для оптимізації конструктивних параметрів червячної фрези і аналізу її кривизни необхідно проаналізувати її теоретичне формоутворення згідно сучасної теорії теоретичного формоутворення. Для цього потрібно проаналізувати сучасні математичні моделі формоутворення.

1.1.2. Математичні моделі теоретичного формоутворення черв'ячних коліс

В основу теорії формоутворення черв'ячних коліс покладена теорія обвідної.

Питаннями формоутворення зубчастих та черв'ячних передач займалися Ф. Л. Литвин, М. І. Колчин, Г. А. Шевелева, М. Л. Єріхов, С. І. Лашнев, Юликов, П. Р. Родін, С. П. Радзевич, Б. А. Перепилиця, А. В. Кривошея, Н. С. Равська, О. А. Охрименко, Є. Б. Кондусова, В. Є. Мельник та інші.

Існує чотири основні системи визначення огинаючих сімейства кривих або поверхонь: графічний та аналітичний способи по Гохману Х. І. Та кінематичний спосіб [4, 20].

З аналітичного способу визначення огинаючих сімейства кривих при формоутворенні методом однопараметричного огинання [16] в системі координат XU сімейство ліній (або рівняння руху формоутворюючого контуру відносно заготовки формоутворюючого контура) визначається параметром t та записується рівнянням:

$$F(x,y,t)=0. \quad (1.1)$$

Також одно параметричне сімейство ліній може бути задано параметричним рівнянням виду:

$$x=f_1(u,t), y=f_2(u,t) \quad (1.2.)$$

Або матричним рівнянням:

$$m_r=m_r(u,t) \quad (1.3.)$$

Відомо з диференційної геометрії, що огинаюча цього сімейства ліній, яка задана в неявній формі, якщо вона існує, задається рівнянням [2]:

$$F(x,y,t)=0, \frac{\partial F(x,y,t)}{\partial t}=0 \quad (1.4.)$$

Огинаючи, сімейства ліній, які задані параметричним рівнянням записується в вигляді системи рівнянь [2]:

$$\begin{cases} x = f_1(u, t) \\ y = f_2(u, t) \end{cases}, \quad \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial u} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} \end{vmatrix} = 0 \quad (1.5.)$$

Рівняння 1.5 записується в одній системі координат. Всі ці рівняння мають рух вихідного формоутворюючого контуру відносно заготовки та записано в вигляді однопараметричного руху з параметром t . Але при реальному формоутворенні цей рух багатопараметричний. Тоді необхідно вказати залежність між параметрами руху або вказати рівняння зв'язку.

Недоліками аналітичного розрахунку по Гохману Х. І. та кінематичним способом визначення огинаючих є:

- використання кінематичної схеми абсолютних рухів ланок;
- математичні моделі, коли не математичні моделі не володіють узагальненням і уніфікацією;
- використовуються рухомі системи координат, які складні для розуміння та складні переходи між ними;
- відсутні повні математичні моделі опису формоутворюючих контурів, в наслідок чого ускладнюється розрахунок модифікованих профілей;

Також визначення огинаючих може бути здійснено графічним методом. Графічний метод найбільш часто використовується на підприємствах та зводиться до викреслювання сімейства плоских кривих та проведенню до них згинаючої кривої. При формоутворенні повинні також виконуватись вимоги дотику ВФК без впровадження в тіло зубчастого вінця, а також умови відсутності перехідних кривих, перетину суміжних ділянок формоутворюючих ліній профілю [16].

Тоді математична модель повинна бути доповнена логічною частиною (блок-схемою), яка враховує підрізання та формоутворення особливими точками.

При аналізі теоретичного формоутворення дискових зубчастих контурів необхідно вирішувати наступні задачі:

1. При заданій формі ВФК, формі заготовки контура зубчастого колеса, параметрах відносної установки та параметрах відносного руху і рівняннях зв'язку визначається (формоутворюється) повний контур зубчастого колеса (зворотне завдання формоутворення).
2. При заданому або формо утвореному контурі зубчастого колеса, заданої заготовці вихідного виробного контура, заданих параметрах установки, параметрах руху контура зубчастого колеса КЗК відносно заготовки вихідного виробляючого контуру ВВК та рівняннях зв'язку визначається форма ВВК (пряме завдання формоутворення).

Рішення перелічених завдань можливе при розробці узагальнених уніфікованих математичних моделей завдання та формоутворення зубчастих ланок за допомогою теорії множин та теорії відображення афінного простору [7, 15].

Рішення перелічених завдань можливе лише з використанням ЕОМ, а також універсальних пакетів прикладних програм Mathcad, Matlab, Maple, Компас, Unigraphics, Solidworks та ін. [2, 12].

Параметри відносної установки та параметри відносного руху заготовки та вихідної формоутворюючої ланки без їх форми визначають кінематичну схему формоутворення [14, 15].

Традиційні кінематичні схеми теоретичного формоутворення контурів циліндричних зубчастих коліс базувались на прямолінійному русі вихідного формоутворюючого рей кого контуру або обертальному русі вихідного формоутворюючого дискового контуру з постійною швидкістю та взаємопов'язаним з ними обертальним рухом з постійною кутовою швидкістю заготовки дискового контура зубчастого колеса [2].

Слід розрізняти кінематичні схеми абсолютного руху заготовок та вихідних формоутворюючих зубчастих ланок при формоутворенні і кінематичні схеми формоутворення [11, 12, 14].

Але, в технічній літературі дуже часто кінематичні схеми абсолютних рухів формоутворюючих ланок та заготовок у власних системах координат називають кінематичними схемами формоутворення, що є помилкою, так як одну і ту ж кінематичну схему формоутворення можна реалізувати більшістю кінематичних схем абсолютних рухів ланок.

При теоретичному формоутворенні кінематична схема відображає тільки рух та параметри установки вихідних формоутворюючих ланок, відносно заготовок зубчастих коліс і, до того ж, відносні рухи зубчастих ланок, які призводять до руху формоутворюючих або формоутворюємих поверхонь «самих по собі» можна не враховувати [10].

Використання різних зубчастих ланок при формоутворенні та обробці, звичайно призводить до різних параметрів установки і параметрам відносного руху ланок.

Вперше класифікацію кінематичних схем формоутворення, тобто рухів формоутворюючих ланок відносно формоутворюємих, які засновані на поєднанні двох рівномірних рухів – обертального та поступального, а також з використанням аксоїдів у вигляді площин циліндрів, конусів та гіперболоїдів розробив Родин П.Р. [10, 11, 13]. Але, кінематичні схеми, що представлені в його класифікації є лише частиною можливої множини кінематичних схем, т. я. представляють формоутворення тільки методою центроїдного обкату з використанням аксоїдів у вигляді тіл обертання простої форми та обмеженої кількості відносних рухів. Хоча існують і інші методи формоутворення, зокрема з використанням аксоїдів більш складної форми (внецентроїдного обкату) або формоутворення методом сліду та копіювання.

Найбільш раціональне для алгоритмізації та програмування на ЕОМ математичний опис кінематичних схем формоутворення деталей, в тому числі і зубчастих ланок, з використанням теорії відображення афінного простору запропоновано Перепелицею Б.А. [9]. Представляючи рух, як одне з приватних афінних перетворень, тобто коли відображаючими операторами є оператор руху $(\bar{\varphi}_i^w, \bar{l}_i^w)$, який показує, що узагальнене рівняння відображення афінного простору перетворюється в узагальнене рівняння будь-якого складного багато

параметричного руху матеріального тіла, в тому числі і формоутворюючої зубчастої ланки. З метою спрощення перетворення Перепелиця Б. А. пропонує в кожному з реперів задавати одне обертання навколо однієї з осей (наприклад вісі Y) та довільно спрямоване перенесення, а сусідні системи координат задавати таким чином, щоб дві вісі суміжних систем координат були попарно паралельні (наприклад вісі Z_1 і Z_2 та X_2 і X_3) [14].

Тоді, якщо задати в 1-шій системі координат формоутворюючу зубчасту ланку (И), а в n -ій системі координат формоутворюєму зубчасту ланку (Д), то узагальнена кінематична схема абсолютного руху формоутворюючої зубчастої ланки в n -ій системі координат фактично є узагальненою кінематичною схемою формоутворення зубчастих ланок різних класів, видів та типів.

Схематично узагальнена кінематична схема формоутворення зубчастих ланок різних класів, видів та типів, яка запропонована Перепелицею Б.А. може бути представлено рис. 1.5.

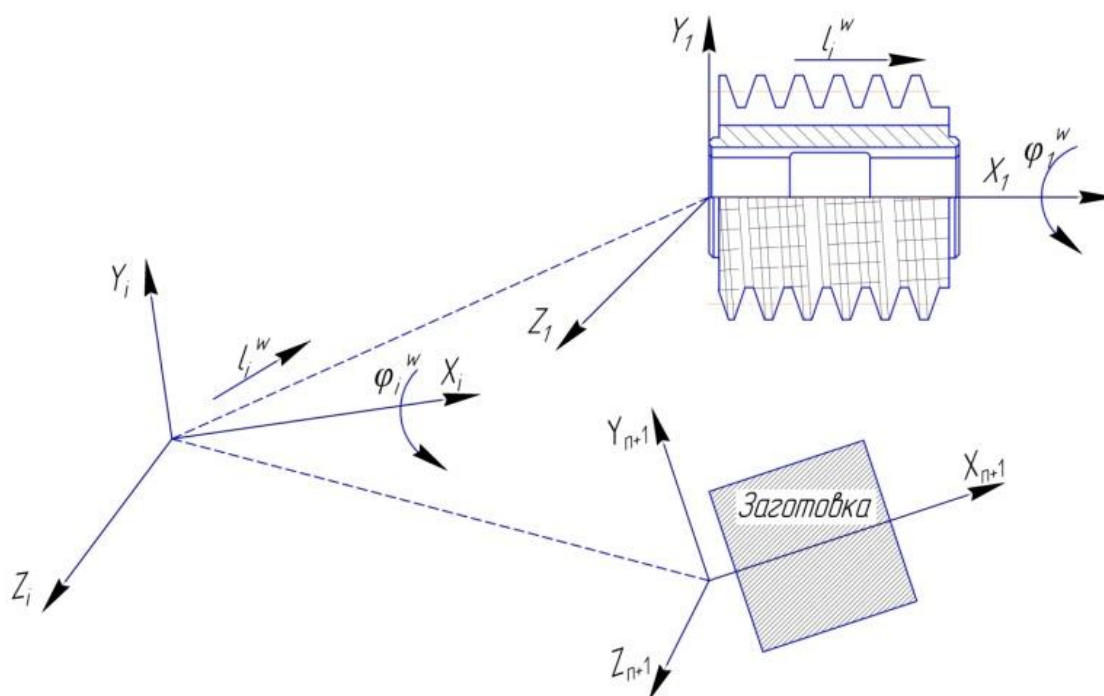


Рис. 1.5. Узагальнена кінематична схема формоутворення циліндричних зубчастих ланок, яка запропонована Перепелицею Б.А.

$И_1$ – формоутворююча зубчаста ланка;

D_n – формоутворена зубчаста ланка.

Відмінність кінематичної схеми, яку представлено на рис. 1.5, від загальноприйнятого уявлення кінематичних схем є в наступному. В першому репері вказані рухи вихідної формоутворюючої ланки у власній системі координат, а в другому репері вказані рухи першого репера з рухомою вихідною формоутворюючою ланкою в другому репері і т.д. Отже, ця узагальнена схема є кінематичною схемою формоутворення.

Згідно узагальненої кінематичної схеми формоутворення (рис.1.5) узагальнена уніфіцірована математична модель формоутворення при однопараметричному огинанні, з використанням матриць 4-го порядку може бути представлена в вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{r0(n+1)H/D} = m_{v_n^w c_n^w} m_{\varphi_n^w l_n^w} \dots \\ \dots m_{v_i^w c_i^w} m_{\varphi_i^w l_i^w} \dots m_{v_1^w c_1^w} m_{\varphi_1^w l_1^w} m_{ru1} \\ \varphi_{1A}^u \leq \varphi_1^u \leq \varphi_{1B}^u \\ \varphi_{1A}^v \leq \varphi_1^v \leq \varphi_{1B}^v \\ \varphi_{1A}^w \leq \varphi_1^w \leq \varphi_{1B}^w \\ \varphi_i = f_{\varphi_i}(\varphi_1^w) \\ l_i = f_{l_i}(\varphi_1^w) \\ n_x v_x + n_y v_y + n_z v_z = 0 \end{array} \right. \quad (1.6)$$

- перше рівняння – це рівняння вихідної формоутворюючої ланки відносно заготовки формоутворюючої ланки в системі координат заготовки;

- система рівнянь утворює рівняння зв'язку параметрів руху;

- останнє рівняння – це рівняння зачеплення

де: φ_1^u, φ_1^v – незалежні параметри поверхонь зубчастих вінців формоутворюючої зубчастої ланки;

$\varphi_{1A}^u, \varphi_{1B}^u$ та $\varphi_{1A}^v, \varphi_{1B}^v$ – відповідно початкові та кінцеві значення незалежних параметрів поверхні зубчастих вінців формоутворюючої зубчастої ланки;

φ_1^w – незалежний параметр руху формоутворюючої зубчастої ланки;

$\varphi_{1A}^w, \varphi_{1B}^w$ – початкове та кінцеве значення незалежного параметра руху формоутворюючої зубчастої ланки;

$m_{r_{u1}}$ – матричне рівняння формоутворюючої поверхні або лінії формоутворюючої зубчастої ланки в першому репері;

$m_{\varphi_i^w l_i^w}$ – матриця руху формоутворюючої зубчастої ланки в і-ому репері;

$m_{\nu_i^w c_i^w}$ – матриця положення, тобто матриця координатних перетворень при переході від і-го к і+1 реперу;

$m_{r_{\partial(n+1)} // D}$ – матричне рівняння руху формоутворюючої ланки (I_1), яке задано в 1-шій системі координат відносно нерухомого формоутворюючої зубчастої ланки (D), яке записане в (n+1) системі координат, тобто в системі координат формоутворюючої зубчастої ланки.

В роботі А. В. Кривошеї ця узагальнена кінематична схема формоутворення та її узагальнена структурна уніфіцірована модель математична модель уточнена. На рис. 1.6, представлено узагальнену кінематичну схему формоутворення при сімі відображенні афінного простору, яка предложена А. В. Кривошея.

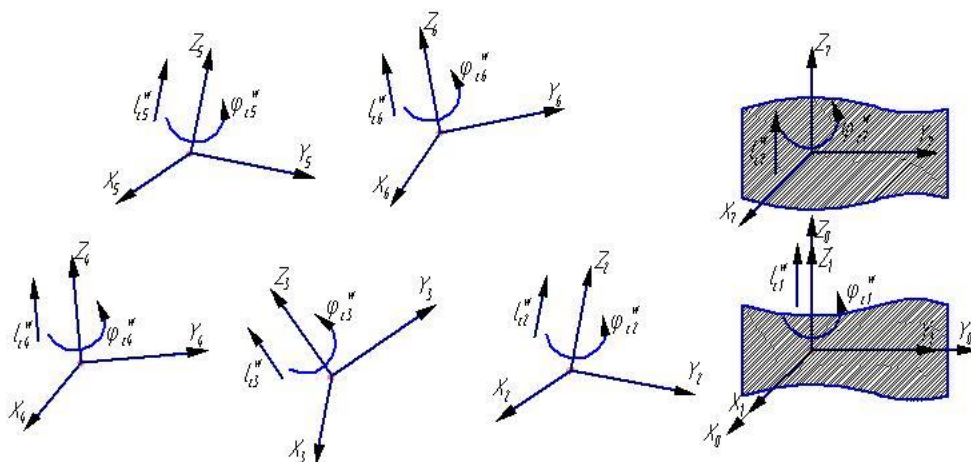


Рис. 1.6. Схематичне уявлення узагальненої кінематичної схеми формоутворення зубчастих ланок різних класів, типів та видів.

$И_7$ – формоутворююча зубчаста ланка; $Д$ – формоутворена зубчаста ланка.

Ця узагальнена кінематична схема представляє сім відображень афінного простору та описує всі відомі (з надлишком) способи формоутворення зубчастих передач.

Відповідно до узагальненої кінематичної схеми формоутворення узагальнена структурна уніфікована математична модель формоутворення зубчастих передач різних класів, типів та видів при двох параметричному огинанні має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{r\partial 0 И / Д} = m_{v_{y1}^w} m_{c_{y1}^w} m_{v_{x1}^w} m_{\phi_{z1}^w} m_{\ell_{z1}^w} m_{v_{y2}^w} m_{c_{y2}^w} m_{v_{x2}^w} m_{\phi_{z2}^w} m_{\ell_{z2}^w} m_{v_{y3}^w} \cdot \\ \cdot m_{c_{y3}^w} m_{v_{x3}^w} m_{\phi_{z3}^w} m_{\ell_{z3}^w} m_{v_{y4}^w} m_{c_{y4}^w} m_{v_{x4}^w} m_{\phi_{z4}^w} m_{\ell_{z4}^w} m_{v_{y5}^w} \cdot \\ \cdot m_{c_{y5}^w} m_{v_{x5}^w} m_{\phi_{z5}^w} m_{\ell_{z5}^w} m_{v_{y6}^w} m_{c_{y6}^w} m_{v_{x6}^w} m_{\phi_{z6}^w} m_{\ell_{z6}^w} m_{ru6} \\ \varphi_{z6A}^w \leq \varphi_{z6}^w \leq \varphi_{z6B}^w \\ \varphi_{zi}^w = f_{\varphi_{zi}^w}(\varphi_{z6}^w) \\ l_{zi}^w = f_{l_{zi}^w}(\varphi_{z6}^w) \\ m_{r\partial} m_{rv} = 0 \text{ при } \varphi_{z6}^w = const \\ m_{r\partial} m_{rv} = 0 \text{ при } \varphi_{zi}^w = const \end{array} \right. \quad (1.7)$$

Окремий випадок такої узагальненої кінематичної схеми теоретичного формоутворення розглядається в данній роботі для аналізу послідовного формоутворення черв'ячного колеса черв'ячною фрезою з поділенням на три частини по висоті профілем інструментальної рейки.

1.1.3. Мета роботи та задачі дослідження

Метою роботи є розробка процесу формоутворення черв'ячних коліс з урахуванням рівномірного припуску при обробці спеціальними черв'ячними фрезами, який розраховано на основі розробленої узагальненої математичної моделі теоретичного формоутворення плоских систем зубчастих зачеплень.

Поставлена мета реалізована шляхом вирішення таких задач:

- розробка моделей математичного опису вихідних формоутворюючих профілів;
- розробка математичної моделі процесу формоутворення черв'ячних коліс з урахуванням рівномірного припуску при обробці;
- визначення раціональних параметрів інструментальної рейки черв'ячної фрези з урахуванням рівномірного припуску при обробці.

1.2. Методика теоретичних досліджень

1.2.1. Спосіб поділення профілю інструментальної рейки черв'ячної фрези

В результаті аналізу літературних джерел та попередніх розрахунків для забезпечення рівномірного припуску при обробці пропонується скористатися методикою Ковришкіна М.О. та Попової О.І. розділенням профілю рейки нормального початкового контуру 1 по висоті на три частини між фрезами для трьох послідовних проходів (рис.1.7-1.9), причому у фрези 2 для першого проходу (рис.1.7) зубці відповідають профілю ніжки зубців рейки нормального початкового контуру, а зубці фрези 4 для третього проходу (рис.1.8) відповідають головці зубців профілю нормального початкового контуру розташованих на одній гвинтовій поверхні. Для усунення перехідного сліду на робочих поверхнях зубців черв'ячного колеса на зубцях 2 фрез першого та зубцях 3 фрез другого проходу (рис.1.9) необхідно виконати перекриття по висоті зубців на величину e [10, 16].

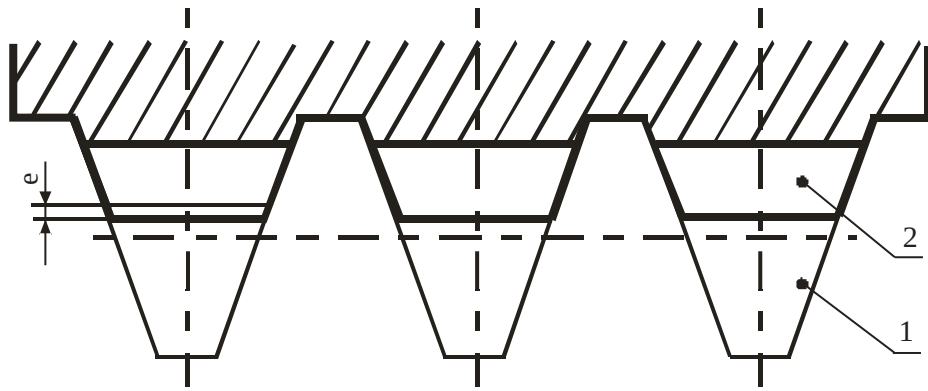


Рис.1.7. Рейка черв'ячної фрези з поділенням профілем для першого проходу.

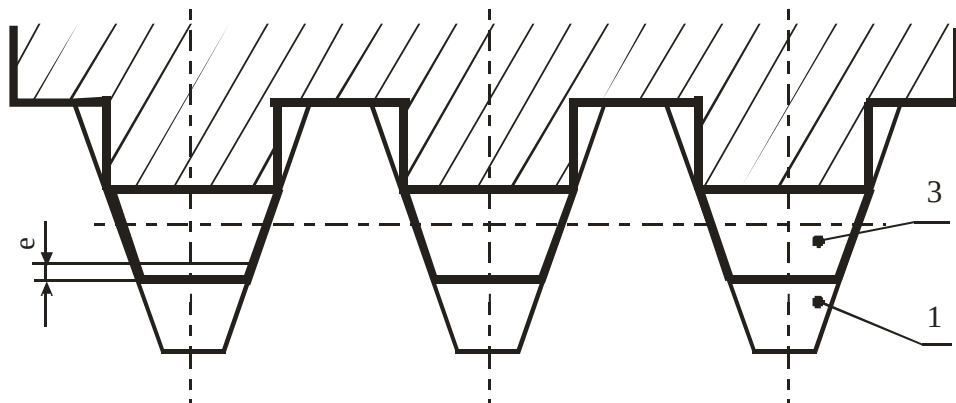


Рис.1.8. Рейка черв'ячної фрези з поділенням профілем для другого проходу.

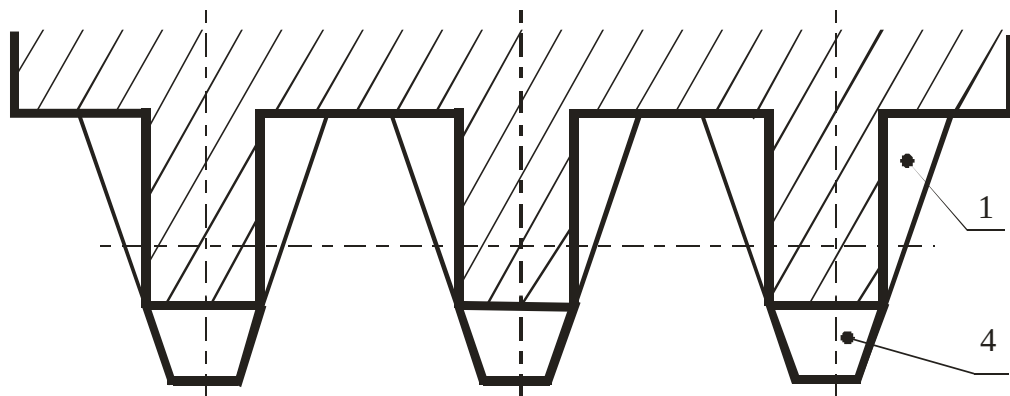


Рис.1.9. Рейка черв'ячної фрези з поділенням профілем для третього проходу.

Щоб уникнути підрізання профілів, сформованих на попередніх проходах, ніжки зубців наступної фрези в нормальному перерізі не виходять за межі нормального початкового контуру і можуть мати довільну форму з точки зору технологічності.

В роботі [10] прийнято, що висота зубців фрез першого, другого та третього проходів є однаковою і дорівнює третині висоти зубця рейки нормального початкового контуру.

1.2.2. Методика математичного опису вихідних формоутворюючих профілей

Згідно теорії відображення афінного простору для опису вихідного формоутворюючого профілю скористаємось кінематичною схемою теоретичного формоутворення рис. 1.10.

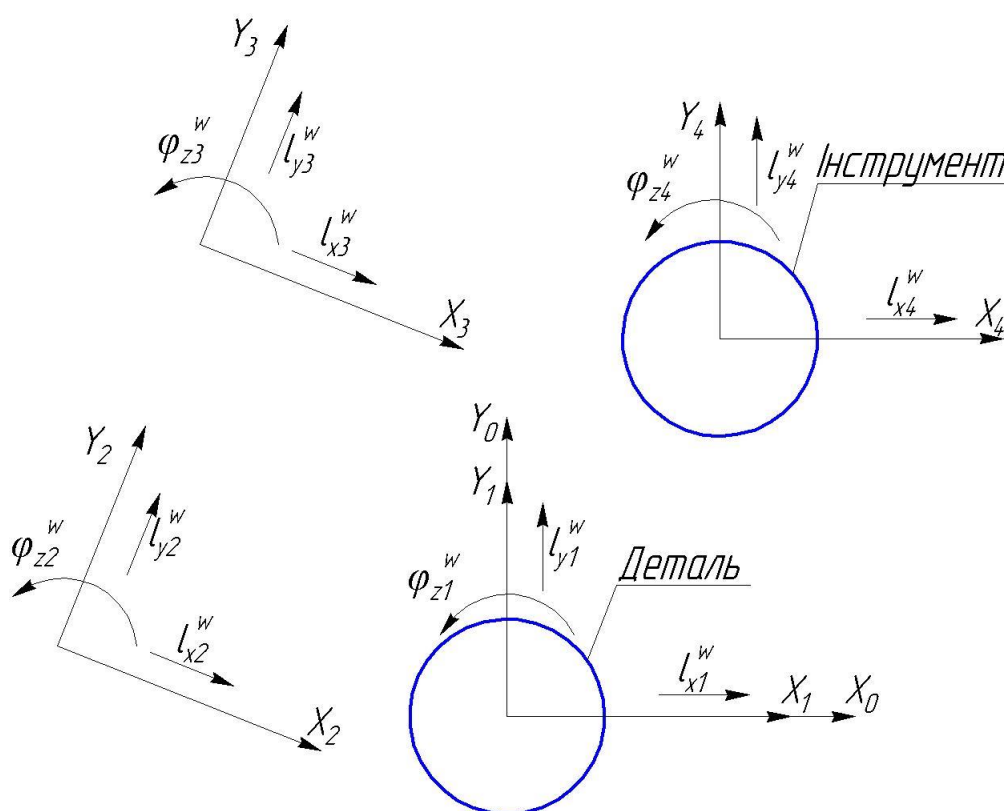


Рис. 1. 10. Кінематична схема теоретичного формоутворення

Запропонована узагальнена кінематична схема формоутворення ланок плоских систем циліндричних зубчастих зачеплень (рис. 1.10). Ця схема має чотири системи координат, що дозволило описати необхідну і достатньо множину досліджуваних кінематичних схем формоутворення. Використовуючи теорію багатопараметричних відображень афінного простору, розроблена узагальнена уніфікована і компактна математична модель формоутворення

ланок плоских систем зубчастих зачеплень без виведення громіздких аналітичних залежностей (1.8):

$$m_{r\text{ И } Д} = m_{\varphi_0^w l_0^w} m_{\varphi_1^w c_1^w} m_{\varphi_1^w l_1^w} m_{\varphi_2^w c_2^w} m_{\varphi_2^w l_2^w} m_{\varphi_3^w c_3^w} m_{\varphi_3^w l_3^w} m_{r\kappa 3}$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_2^w &= \varphi_2^w(\varphi_3^w) \\ \varphi_1^w &= \varphi_1^w(\varphi_3^w) \\ \varphi_0^w &= \varphi_0^w(\varphi_3^w) \\ l_3^w &= l_3^w(\varphi_3^w) \\ l_2^w &= l_2^w(\varphi_3^w) \\ l_1^w &= l_1^w(\varphi_3^w) \\ l_0^w &= l_0^w(\varphi_3^w) \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

$$n_{\kappa\kappa 3}(\varphi_3^w) v_{\kappa\kappa 3}(\varphi_3^w) + n_{y\kappa 3}(\varphi_3^w) v_{y\kappa 3}(\varphi_3^w) = 0$$

Перше рівняння в цій моделі описує відносний рух формоутворюючої ланки відносно формоутворювальної ланки, де $m_{r\kappa 3}$ – матриця контуру інструмента, $m_{\varphi_i^w l_i^w}$ – матриці відносно руху контуру інструмента, $m_{\varphi_i^w c_i^w}$ – матриці відносного положення. Наступні рівняння описують зв'язок між параметрами відносного руху формоутворюючої ланки. Останнє рівняння системи (1.8) описує основну умову формоутворення.

Розроблен алгоритм для завдання та математичного опису вихідного формоутворюючого профілю стандартного вихідного контуру евольвеної передачі, яка є контршаблоном стандартного вихідного контуру (Додаток А) (рис.1.11).

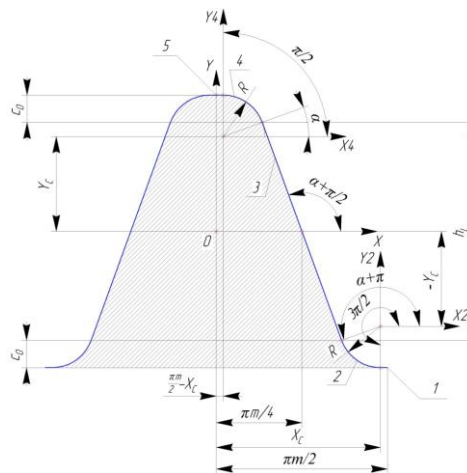


Рис. 1.11. Будова евольвентного вихідного формоутворюючого профілю

Вихідними даними для завдання та математичного опису є: модуль (m), гранична висота профілю (h_l), кут профілю вихідного контуру (α), радіальний зазор (c), радіус скруглення ρ_f .

Послідовність алгоритму завдання та математичного опису:

1. Задається система координат, в якій вісь ОУ співпадає з ділильною лінією профілю, а вісь ОХ є віссю симетрії профілю.
2. З початку побудову необхідно починати з ділянки 3 (рис. 1.11) – головної бокової поверхні вихідного формоутворюючого контуру:

$$m_{rl3}(\varphi^u) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{\pi m}{4} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} l \cos(\alpha + \frac{\pi}{2}) \\ l \sin(\alpha + \frac{\pi}{2}) \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}, \quad (1.9)$$

де l - змінний параметр.

3. Потім будуюмо ділянку 2 (рис. 1.11) – прфіль перехідної поверхні впадин вихідного формоутворюючого контуру:

$$m_{rR2}(R, \varphi^u) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & X_C \\ 0 & 1 & 0 & -Y_C \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} R \cos(\varphi) \\ R \sin(\varphi) \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}, \quad (1.10)$$

де параметр R – const.

Згідно ГОСТ 13755-81 $R=0,38m$, з рисунка 2.2 видно, що змінний параметр φ знаходиться в діапазоні від $\alpha + \pi$ до $\frac{3\pi}{2}$, параметри X_C та Y_C знаходимо з системи рівнянь:

$$\begin{cases} R \cos(\pi + \alpha) + X_C = \frac{\pi m}{4} + h_l^* m \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \\ R \sin(\pi + \alpha) + Y_C = -h_l^* m \end{cases} \quad (1.11)$$

4. Ділянка 4 (рис.1.11) будується аналогічно як і ділянка 2, тільки змінний параметр φ матиме область застосування від α до $\frac{\pi}{2}$.

$$m_{rR4}(R, \varphi^u) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{\pi m}{2} - X_C \\ 0 & 1 & 0 & Y_C \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} R \cos(\varphi) \\ R \sin(\varphi) \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}. \quad (1.12)$$

5. Ділянка 1 (рис. 1.11) – пряма лінія, що задається матрицею:

$$m_{rl1}(\varphi^u) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{\pi m}{2} \\ 0 & 1 & 0 & -(Y_C + R) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} l \cos(\pi) \\ l \sin(\pi) \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}. \quad (1.13)$$

6. Ділянка 5 – пряма лінія, що задається матрицею:

$$m_{rl5}(\varphi^u) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_C + R \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} l \cos(\pi) \\ l \sin(\pi) \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}. \quad (1.14)$$

Рівняння рейкових та дискових контурів з використанням теорії множин має вигляд (1.15):

$$\begin{aligned} \text{а) рейкових: } m_{r_k} &= m_{r_{\Pi}} \cup m_{l_{x1k}}^* m_{r_{\Pi}} \cup m_{2l_{x1k}}^* m_{r_{\Pi}} \dots \cup m_{l_{x1k}}^* m_{r_{\Pi}} \dots \cup m_{(z-1)l_{x1k}}^* m_{r_{\Pi}} \\ \text{б) дискових: } m_{r_k} &= m_{r_{\Pi}} \cup m_{\varphi_{z1k}}^* m_{r_{\Pi}} \dots \cup m_{i\varphi_{z1k}}^* m_{r_{\Pi}} \dots \cup m_{(z-1)\varphi_{z1k}}^* m_{r_{\Pi}} \end{aligned} \quad (1.15)$$

Для завдання та математичного опису ланок системи, їх складних рухів, рішення задач формоутворення, аналізу та формоутворюючого профілю спряжених зубчастих зачеплень ФПСЗЗ необхідно використовувати математичний апарат, який дозволяє уявити в узагальненому уніфікованому та структурному вигляді всі вищеперелічені математичні моделі, тобто математичні моделі вихідних формоутворюючих контурів, заготовок зубчастих контурів, їх відносні рухи, моделі формоутворення. Цей математичний апарат повинен бути добре адаптований до ЕОМ. В результаті аналізу научної літератури, встановлено, що таким математичним апаратом являє теорія відображення афінного простору, яка до теперішнього часу не знайшла широкого використання як в теорії зубчастих зачеплень так і в теорії формоутворення поверхонь різанням.

Математичний апарат відображення афінного простору предложений Перепелицей Б. А. для опису геометричних об'єктів складної форми та структури, та також для опису їх абсолютних та відносних рухів є в теперішній час одним із найбільш раціональним математичним апаратом для рішення питань завдання та вормойтворення, та найбільш адаптивним апаратом для застосування його в об'єктно орієнтованих програмах ЕОМ [9, 16].

Матричне уявлення використовується в частості для запису афінних перетворень в комп'ютерній графіці. Зазначена форма використовується в OpenGL, DirectX (де координати представляються в вигляді матриці 4×4).

Уніфіковані матриці руху та матриці координатних перетворень приведені в табл. 1.1.

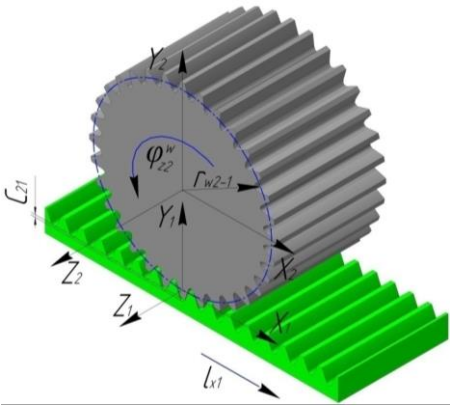
Таблиця матриць руху та матриць координатних перетворень

$m_{\varphi_x^w}$	$m_{\varphi_y^w}$	$m_{\varphi_z^w}$
$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi_x^w & -\sin\varphi_x^w & 0 \\ 0 & \sin\varphi_x^w & \cos\varphi_x^w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} \cos\varphi_y^w & 0 & \sin\varphi_y^w & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\varphi_y^w & 0 & \cos\varphi_y^w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} \cos\varphi_z^w & -\sin\varphi_z^w & 0 & 0 \\ \sin\varphi_z^w & \cos\varphi_z^w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$
$m_{l_x^w}$	$m_{l_y^w}$	$m_{l_z^w}$
$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & l_x^w \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_y^w \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_z^w \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$
$m_{v_x^w}$	$m_{v_y^w}$	$m_{v_z^w}$
$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos v_x^w & \sin v_x^w & 0 \\ 0 & -\sin v_x^w & \cos v_x^w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} \cos v_y^w & 0 & \sin v_y^w & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin v_y^w & 0 & \cos v_y^w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} \cos v_z^w & -\sin v_z^w & 0 & 0 \\ -\sin v_z^w & \cos v_z^w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$
$m_{c_x^w}$	$m_{c_y^w}$	$m_{c_z^w}$
$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & c_x^w \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & c_y^w \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c_z^w \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$

1.3. Визначення раціональних параметрів інструментальної рейки черв'ячної фрези з урахуванням рівномірного припуску при обробці

Математична модель відносних рухів схеми формоутворення плоского зубчастого контуру приведено в табл. 1.2, [13, 16].

Кінематична схема формоутворення та її математична модель

Кінематична схема формоутворення	Рівняння відносного руху в системі координат $X_2O_2Y_2$
	$m_{rII(1-2)} = m_{\varphi_{z2}^w} m_{Cy12} m_{l1} m_{rII(1)}$ $-\frac{\pi}{4} \leq \varphi_{z2}^w \leq \frac{\pi}{4}$ $l_{x1} = K_{lx1} \varphi_{z2}^w$ $K_{lx1} = -r_{w(2-1)}$ $C_{y12} = -r_{w(2-1)}$ $n_{xk0} v_{xk0} + n_{yk0} v_{yk0} = 0$

Згідно методики отримано рівняння бічної сторони зуб'їв першого проходу:

$$mr_1(l_1^u) = \begin{vmatrix} l_1^u \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) + \frac{S_{no}}{2} \\ l_1^u \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.16)$$

Кут нахилу $\alpha = 20^\circ$, $S_{no} = 4,852$ відповідно до креслення, забезпечує зрушення по вісі ОХ на задану величину. l_1^u – незалежний параметр.

Рівняння основи інструментальної рейки зуб'їв першого проходу.

$$mr_2(l_2^u) = \begin{vmatrix} l_2^u \cdot \cos \alpha_2 \\ l_2^u \cdot \sin \alpha_2 - \frac{h}{2} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.17)$$

$\alpha_2 = 0^0$ - забезпечує паралельність з віссю ОХ, $h = 7,5$ - висота інструментальної рейки відповідно до креслення (Додаток А). l_2^u – незалежний параметр.

Рівняння вершини інструментальної рейки зуб'їв першого проходу .

$$mr_3(l_3^u) = \begin{vmatrix} l_3^u \cdot \cos \alpha_3 \\ l_3^u \cdot \sin \alpha_3 - \frac{h}{2} + 3,25 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.18)$$

$\alpha_3 = 0^0$ - забезпечує паралельність з віссю ОХ ОХ, $h = 7,5$ - висота інструментальної рейки відповідно з кресленням (Додаток А). Значення 3,25 – висота інструментальної рейки першого проходу. l_3^u – незалежний параметр.

Рівняння радіусної ділянки біля основи інструментальної рейки зуб'їв першого проходу.

$$mr_4(\varphi_4^u) = \begin{vmatrix} R_{f0} \cdot \cos \varphi_4^u + X_{r4} \\ R_{f0} \cdot \sin \varphi_4^u + Y_{r4} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.19)$$

де $R_{f0} = 0,9$, задається відповідно до креслення (Додаток А); φ_4^u – незалежний параметр, діапазон якого від $\alpha + \pi$ до $\frac{3\pi}{2}$.

X_{r4}, Y_{r4} – координати центру радіусної ділянки за умови його сполучення з ділянками 1 и 2 без точки зламу, відповідно:

$$X_{r4} = |Y_{r4}| \cdot \operatorname{tg} \alpha + \frac{R_{f0}}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha)} + \frac{S_{no}}{2}; \quad (1.20)$$

$$Y_{r4} = -\frac{h}{2} + R_{f0} . \quad (1.21)$$

Рівняння радіусної ділянки біля вершини інструментальної рейки зуб'їв першого проходу.

$$mr_5(\varphi_5^u) = \begin{vmatrix} R_{op} \cdot \cos \varphi_5^u + X_{r5} \\ R_{op} \cdot \sin \varphi_5^u + Y_{r5} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.22)$$

де $R_{op} = 1,14$, задається відповідно до креслення (Додаток А); φ_5^u – незалежний параметр, діапазон якого від α до $\frac{\pi}{2}$.

X_{r5}, Y_{r5} – координати центру радіусної ділянки за умови його сполучення з ділянками 1 и 2 без точки зламу, відповідно:

$$X_{r5} = \frac{S_{no}}{2} + tg\alpha \cdot (|Y_{r5}| - R_{op} \cdot \sin \alpha) - R_{op} \cdot \cos \alpha \quad (1.23)$$

$$Y_{r5} = -\frac{h}{2} + 3,25 - R_{op} \quad (1.24)$$

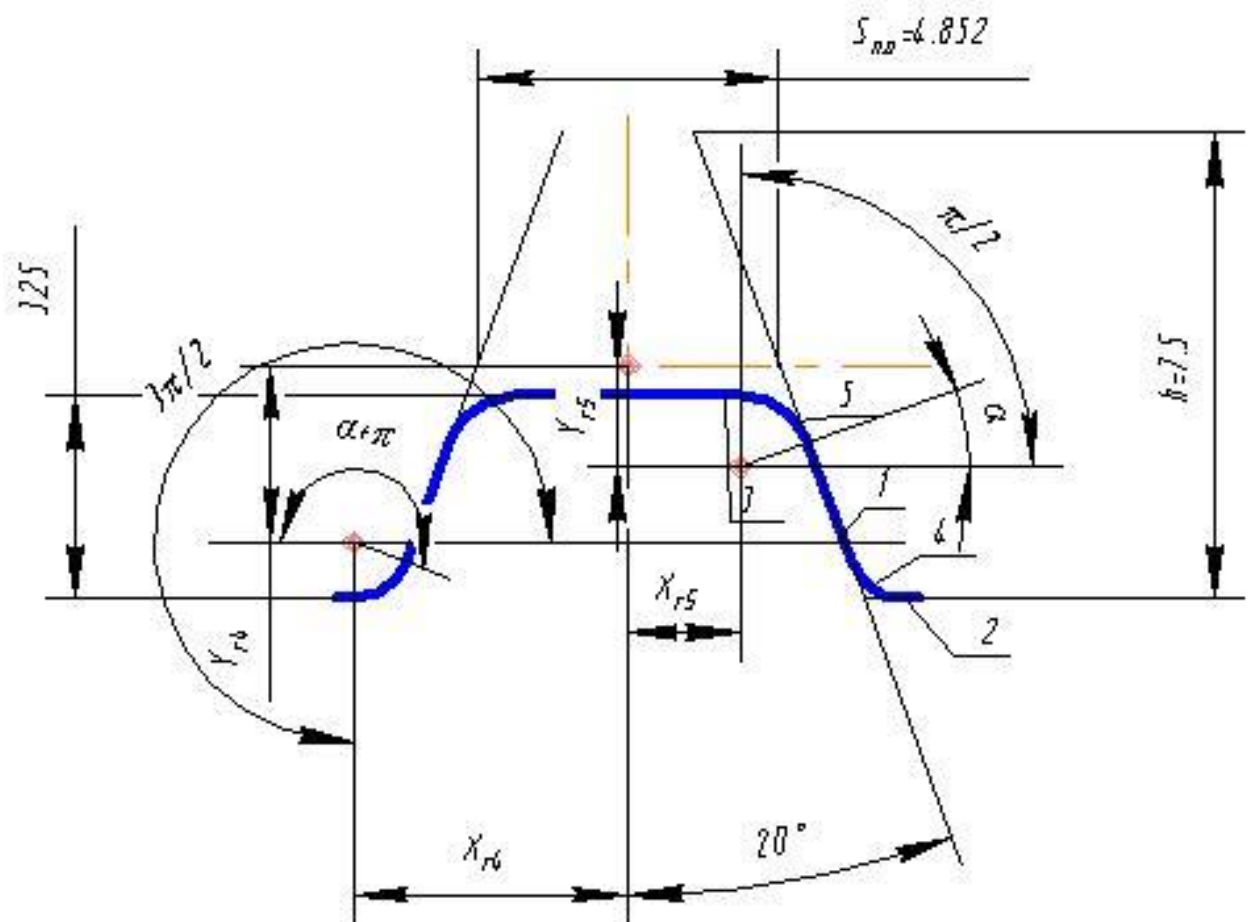


Рис. 1.12. Вихідний формоутворюючий контур: 1 – бічна сторона, 2 – ніжка зуба, 3 – вершина інструментальної рейки, 4 – радіусна ділянка, 5 – радіусна ділянка вершини рейки.

Рівняння бічної сторони зуб'ів другого проходу.

$$mr_1(l_1^u) = \begin{vmatrix} l_1^u \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha) + \frac{S_{no}}{2} \\ l_1^u \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \alpha) \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.25)$$

Кут нахилу $\alpha = 20^\circ$, $S_{no} = 4,852$ відповідно до креслення, забезпечує зсув по вісі ОХ на задану величину. l_1^u – незалежний параметр.

Рівняння основи інструментальної рейки зуб'ів другого проходу.

$$mr_2(l_2^u) = \begin{vmatrix} l_2^u \cdot \cos \alpha_2 \\ l_2^u \cdot \sin \alpha_2 - \frac{h}{2} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.26)$$

$\alpha_2=0^0$, що забезпечує паралельність з віссю ОХ, $h=7,5$ - висота інструментальної рейки відповідно до креслення (Додаток А). l_2^u – незалежний параметр.

Рівняння вершини інструментальної рейки зуб'їв другого проходу.

$$mr_3(l_3^u) = \begin{vmatrix} l_3^u \cdot \cos \alpha_3 \\ l_3^u \cdot \sin \alpha_3 - \frac{h}{2} + 5,75 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.27)$$

$\alpha_3=0^0$, що забезпечує паралельність з віссю ОХ, $h=7,5$ - висота інструментальної рейки відповідно до креслення. Значення 5,75 - висота інструментальної рейки другого проходу. l_3^u – незалежний параметр.

Рівняння радіусної ділянки біля основи інструментальної рейки зуб'їв другого проходу.

$$mr_4(\varphi_4^u) = \begin{vmatrix} R_{f_0} \cdot \cos \varphi_4^u + X_{r4} \\ R_{f_0} \cdot \sin \varphi_4^u + Y_{r4} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.28)$$

$\alpha_1=15^\circ$, відповідно до креслення кут основи рейки, $R_{f_0} = 0,9$, відповідно до креслення. X_{r4}, Y_{r4} – координати центру радіусної ділянки з умови його сполучення з ділянками 1 и 2 без точки зламу, відповідно:

$$X_{r4} = |Y_{r4}| \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 + \frac{R_{f0}}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha_1)} + \frac{1,25}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha_1)} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha_1) -$$

$$- \frac{1,25}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha)} + \frac{S_{no}}{2} \quad ;(1.29)$$

$$Y_{r4} = -\frac{h}{2} + R_{f0} . \quad (1.30)$$

φ_4^u – незалежний параметр, діапазон якого від $\alpha_1 + \pi$ до $\frac{3\pi}{2}$.

Рівняння радіусної ділянки біля вершини інструментальної рейки зуб'їв другого проходу.

$$mr_5(\varphi_5^u) = \begin{vmatrix} R_{op} \cdot \cos \varphi_5^u + X_{r5} \\ R_{op} \cdot \sin \varphi_5^u + Y_{r5} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.31)$$

$R_{op} = 1,14$, відповідно до креслення. X_{r5}, Y_{r5} – координати центру радіусної ділянки з умови його сполучення з ділянками 1 и 3 без точки зламу, відповідно:

$$X_{r5} = \frac{S_{no}}{2} - \operatorname{tg} \alpha \cdot (Y_{r5} + R_{op} \cdot \sin \alpha) - R_{op} \cdot \cos \alpha ; \quad (1.32)$$

$$Y_{r5} = -\frac{h}{2} + 5,75 - R_{op} . \quad (1.33)$$

φ_5^u – незалежний параметр, діапазон якого від α до $\frac{\pi}{2}$.

Рівняння додаткової ділянки бічної сторони зуб'їв другого проходу.

$$mr_6(l_6^u) = \begin{vmatrix} l_6^u \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha_1) - \frac{1,25}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha)} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha) + \frac{S_{no}}{2} \\ l_6^u \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \alpha_1) - 1,25 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.34)$$

$\alpha_1=15^\circ$, відповідно до креслення кут біля основи рейки, при цьому по вісі ОУ пряма зрушена на -1,25 відповідно до креслення, тобто половина висоти рейки це $(7,5/2=3,75; 5,75-3,75=2)$ висота виступаючої частини бічної сторони над ділильною лінією, відповідно величина по вісі ОУ 20^0 ділянки нижче ділильної лінії дорівнює $3,25-2=1,25$. Маючи значення -1,25 по вісі ОУ 20^0 ділянки (рівняння 1.16) можна знайти координату по вісі ОХ:

$$l_1^u \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha) + \frac{S_{no}}{2} = X; \quad (1.35)$$

$$l_1^u \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \alpha) = -1,25, \text{ відповідно } X = -\frac{1,25}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha)} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha) + \frac{S_{no}}{2}.$$

Рівняння бічної сторони зуб'їв третього проходу.

$$mr_1(l_1^u) = \begin{vmatrix} l_1^u \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha) + \frac{S_{no}}{2} \\ l_1^u \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \alpha) \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.36)$$

Кут нахилу $\alpha = 20^0$, $S_{no} = 4,852$ відповідно до креслення, забезпечує зсув по вісі ОХ на задану величину. l_1^u – незалежний параметр.

Рівняння основи інструментальної рейки зуб'їв третього проходу.

$$mr_2(l_2^u) = \begin{vmatrix} l_2^u \cdot \cos \alpha_2 \\ l_2^u \cdot \sin \alpha_2 - \frac{h}{2} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.37)$$

Кут $\alpha_2 = 0^\circ$, що забезпечує паралельність з віссю ОХ, $h = 7,5$ - висота інструментальної рейки відповідно до креслення. l_2^u – незалежний параметр.

Рівняння вершини інструментальної рейки зуб'їв третього проходу.

$$mr_3(l_3^u) = \begin{vmatrix} l_3^u \cdot \cos \alpha_3 \\ l_3^u \cdot \sin \alpha_3 - \frac{h}{2} + 7,5 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.38)$$

$\alpha_3 = 0^\circ$, що забезпечує паралельність з віссю ОХ, $h = 7,5$ - висота інструментальної рейки відповідно до креслення для третього проходу. l_3^u – незалежний параметр.

Рівняння радіусної ділянки біля основи інструментальної рейки зуб'їв третього проходу.

$$mr_4(\varphi_4^u) = \begin{vmatrix} R_{\rho} \cdot \cos \varphi_4^u + X_{r4} \\ R_{\rho} \cdot \sin \varphi_4^u + Y_{r4} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.39)$$

$\alpha_1 = 15^\circ$, відповідно до креслення (Додаток А) кут біля основи рейки, $R_{\rho} = 0,9$, відповідно до креслення. X_{r4}, Y_{r4} – координати центру радіусної ділянки за умови його сполучення з ділянками 1 и 2 без точки зламу, відповідно:

$$X_{r4} = |Y_{r4}| \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1) + \frac{R_{fo}}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha_1)} - \frac{1,25}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha_1)} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha_1) +$$

$$+ \frac{1,25}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha)} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha) + \frac{S_{no}}{2} ; \quad (1.40)$$

$$Y_{r4} = -\frac{h}{2} + R_{fo} . \quad (1.41)$$

φ_4^u – незалежний параметр, діапазон якого від $\alpha_1 + \pi$ до $\frac{3\pi}{2}$.

Рівняння радіусної ділянки біля вершини інструментальної рейки зуб'їв третього проходу.

$$mr_5(\varphi_5^u) = \begin{vmatrix} R_{op} \cdot \cos \varphi_5^u + X_{r5} \\ R_{op} \cdot \sin \varphi_5^u + Y_{r5} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.42)$$

$R_{op} = 1,14$, відповідно до креслення. X_{r5}, Y_{r5} – координати центру радіусної ділянки за умови його сполучення з ділянками 1 и 3 без точки зламу, відповідно:

$$X_{r5} = \frac{S_{no}}{2} - \operatorname{tg} \alpha \cdot (Y_{r5} + R_{op} \cdot \sin \alpha) - R_{op} \cdot \cos \alpha ; \quad (1.43)$$

$$Y_{r5} = -\frac{h}{2} + 7,5 - R_{op} . \quad (1.44)$$

φ_5^u – незалежний параметр, діапазон якого від α до $\frac{\pi}{2}$.

Рівняння додаткової ділянки бічної сторони зуб'їв третього проходу.

$$mr_6(l_6^u) = \begin{vmatrix} l_6^u \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha_1) + \frac{1,25}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha)} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha) + \frac{S_{no}}{2} \\ l_6^u \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \alpha_1) + 1,25 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1.45)$$

$\alpha_1=15^\circ$, відповідно до креслення кут біля основи рейки, при цьому по вісі ОУ пряма зрушена на -1,25 відповідно до креслення, тобто половина висоти рейки це $7,5/2=3,75$, $3,75-2,5=1,25$ висота виступаючої частини бічної сторони над ділильною лінією. Маючи значення -1,25 по вісі ОУ 20⁰ ділянки (рівняння 1.16) можна знайти координату по вісі ОХ:

$$l_1^u \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) + \frac{S_{no}}{2} = X ; \quad (1.46)$$

$$l_1^u \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) = 1,25, \text{ відповідно } X = \frac{1,25}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) + \frac{S_{no}}{2}.$$

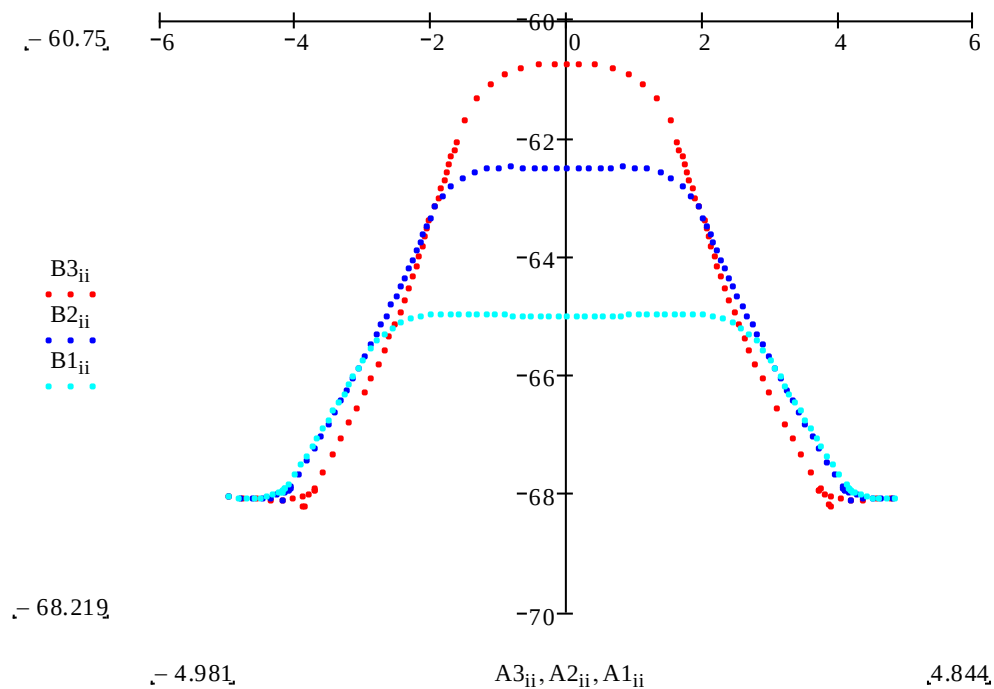


Рис. 1.13. Поетапне формоутворення профілю зуба черв'ячного колеса (кут ніжки зубця 18° , радіуси 1.14мм): В1 –перший прохід, В2- другий прохід, В3 – третій прохід.

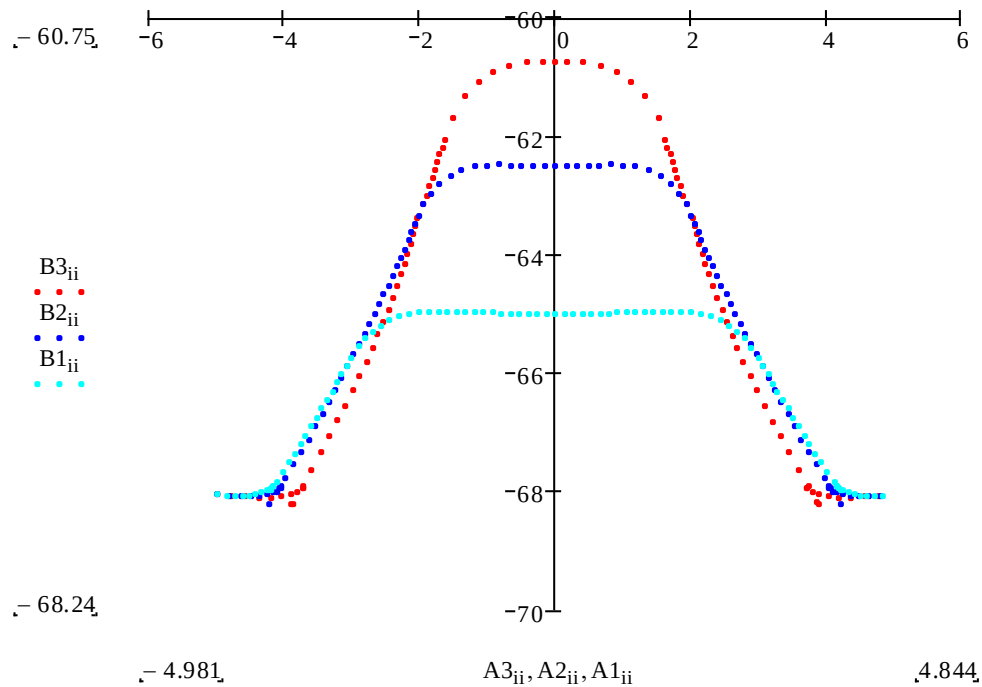


Рис. 1.14. Поетапне формоутворення профілю зуба черв'ячного колеса (кут ніжки зубця 17°, радіуси 1.14мм): B1 –перший прохід, B2- другий прохід, B3 – третій прохід.

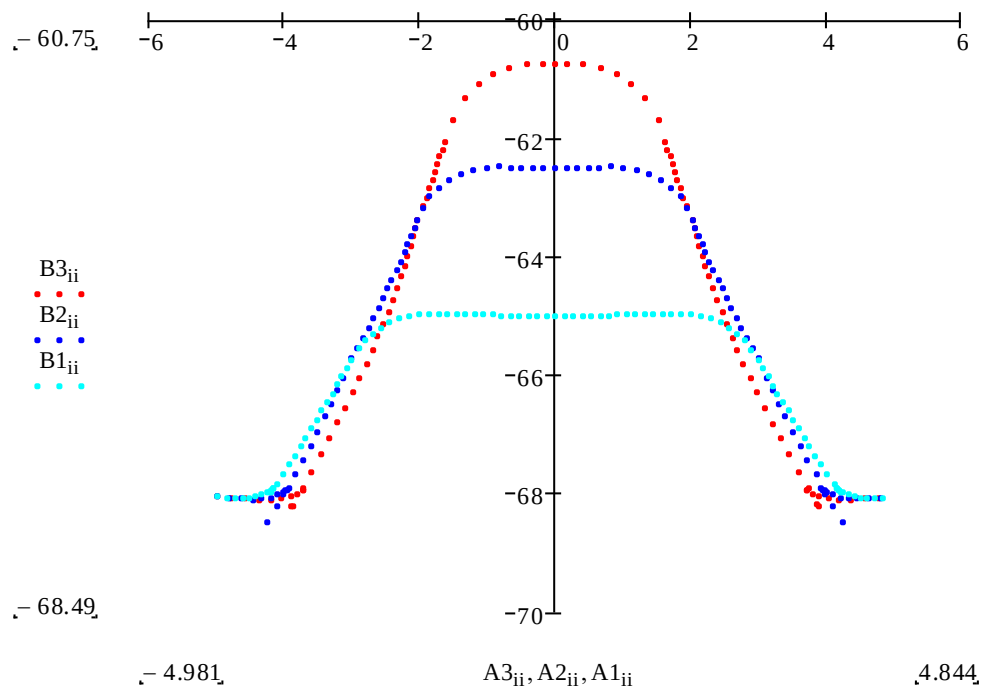


Рис. 1.15. Поетапне формоутворення профілю зуба черв'ячного колеса (кут ніжки зубця 14°, радіуси 1.14мм): B1 –перший прохід, B2- другий прохід, B3 – третій прохід.

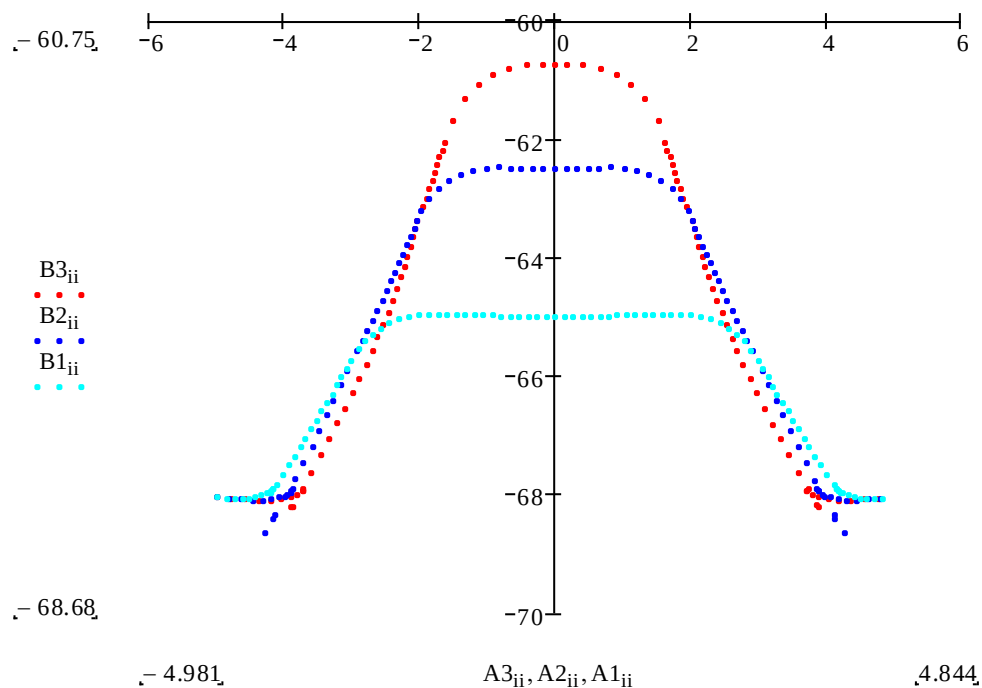


Рис. 1.16. Поетапне формоутворення профілю зуба черв'ячного колеса (кут ніжки зубця 12^0 , радіуси 1.14мм): B1 –перший прохід, B2- другий прохід, B3 – третій прохід.

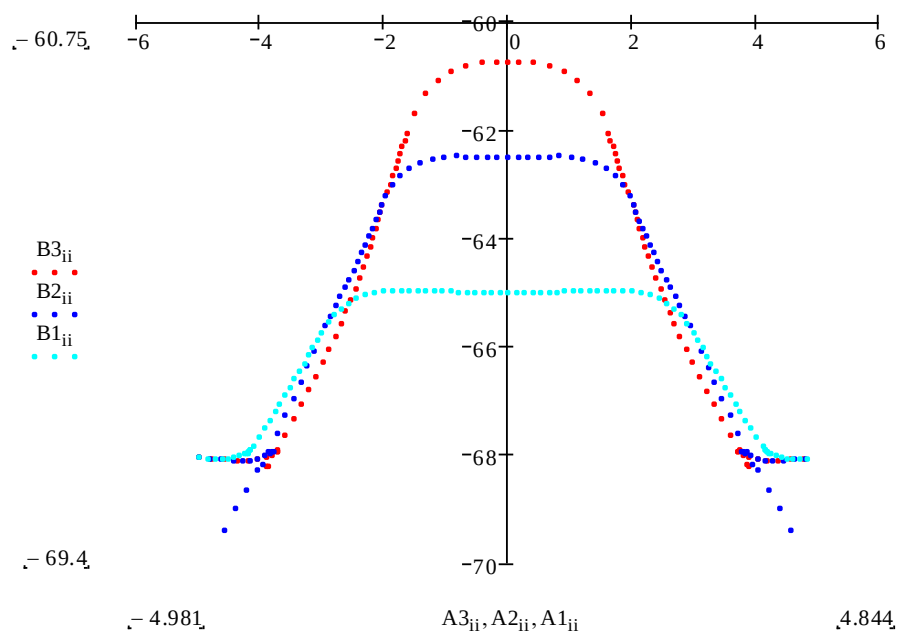


Рис. 1.17. Поетапне формоутворення профілю зуба черв'ячного колеса (кут ніжки зубця 10^0 , радіуси 1.14мм): B1 –перший прохід, B2- другий прохід, B3 – третійпрохід.

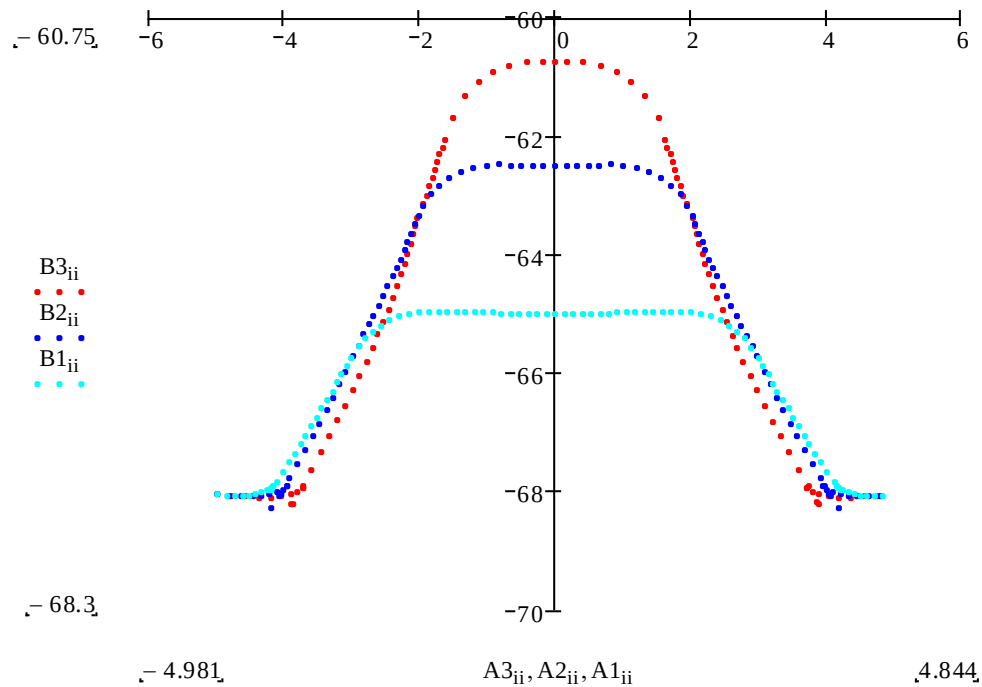


Рис. 1.18. Поетапне формоутворення профілю зуба черв'ячного колеса (кут ніжки зубця 15^0 , радіуси 1.14мм): B1 – перший прохід, B2- другий прохід, B3 – третій прохід.

З аналізу рис.1.13 – 1.18 встановлено, що для фрези з поділеним профілем по висоті на три частини інструментальної рейки оптимальне значення кута ніжки зубця 14^0 - 15^0 . Поетапне утворення профілю черв'ячного колеса фрезою з оптимальними параметрами приведено на рис. 1.19 – 1.21.

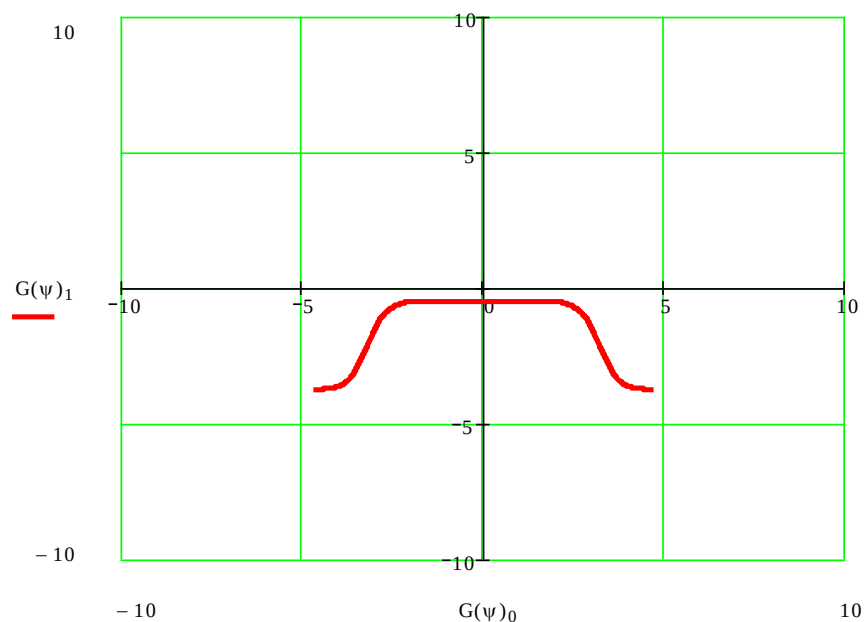


Рис. 1.19. Профиль зубця черв'ячного колеса, який отриманий зубцями фрези для першого проходу.

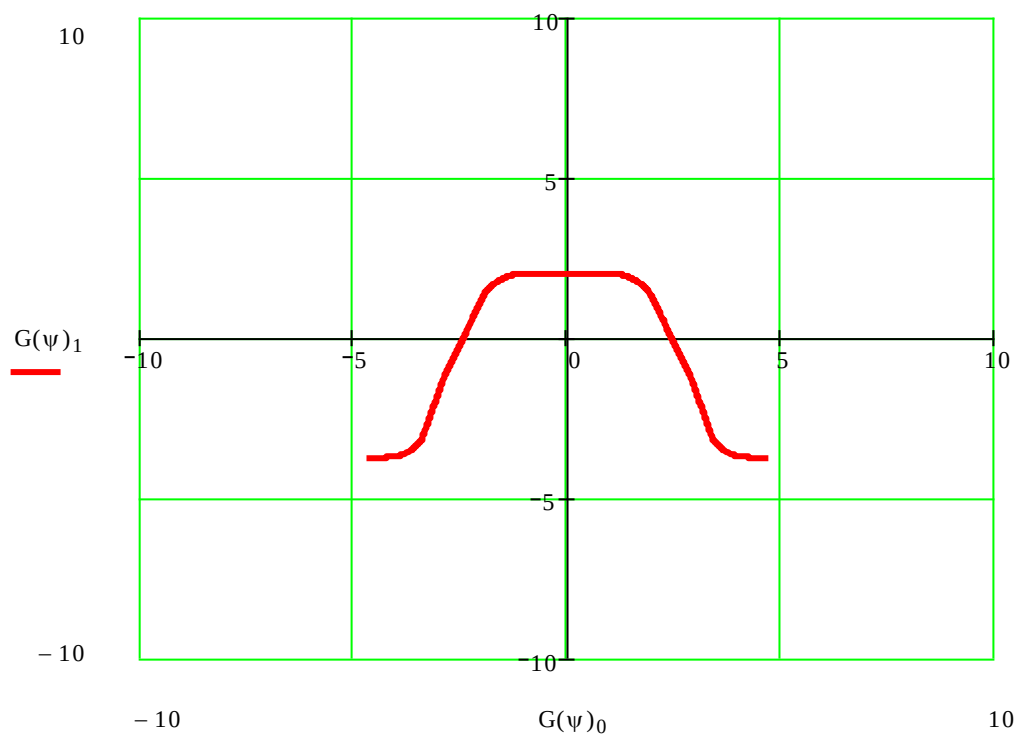


Рис. 1.20. Профиль зубця черв'ячного колеса, який отриманий зубцями фрези для другого проходу.

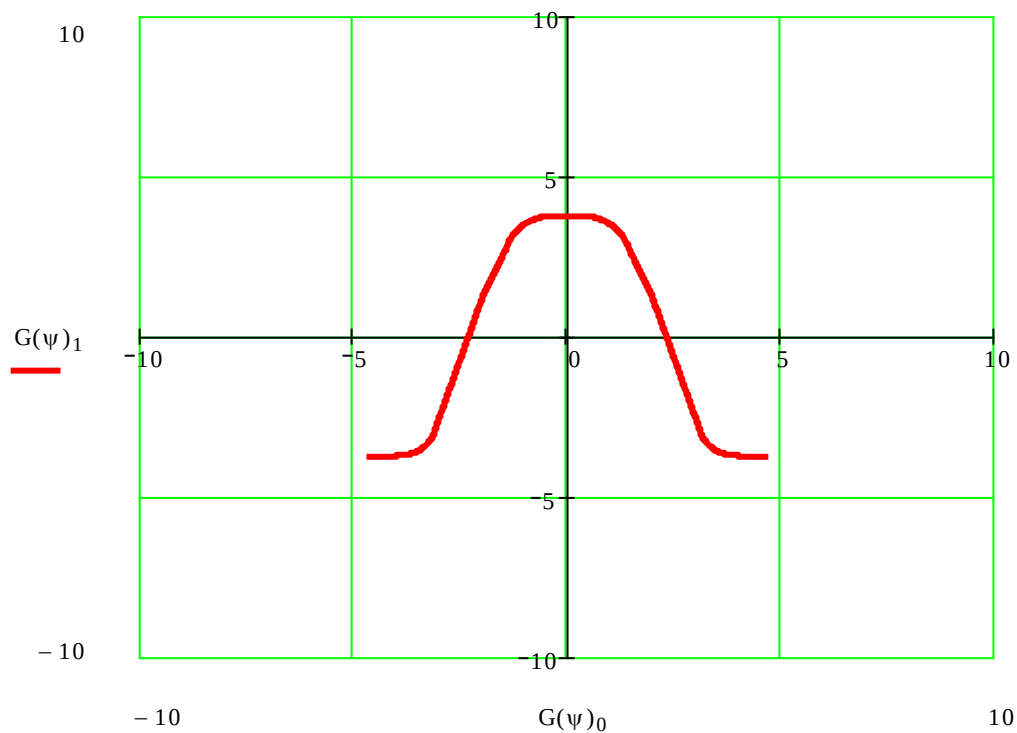


Рис. 1.21. Профиль зубця черв'ячного колеса, який отриманий зубцями фрези для третьего проходу.

1.4. Розробка конструкції інструментальної рейки черв'ячної фрези з урахуванням рівномірного припуску при обробці

З отриманих результатів досліджень формоутворення та провівши необхідні розрахунки отримано профіль інструментальної рейки черв'ячної фрези який забезпечує рівномірний припуск при обробці $m=3$ мм, $d_a=58,5$ мм (рис. 1.22.)

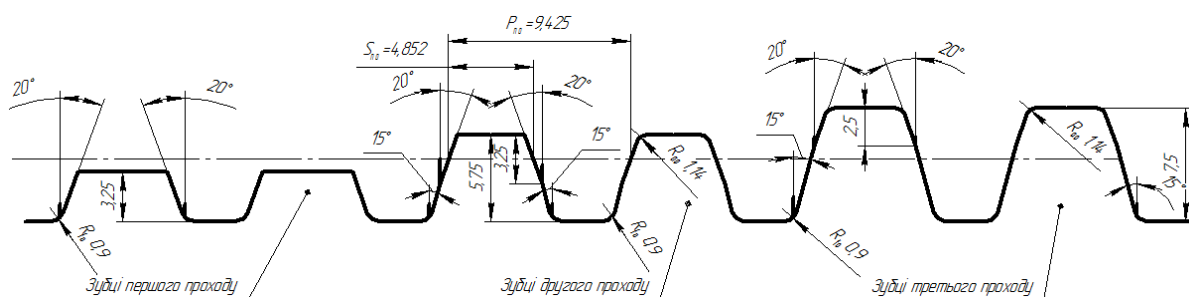


Рис 1.22. Профіль інструментальної рейки нової черв'ячної фрези $m=3$ мм, $d_a=58,5$ мм

Для фрез з поділенням по висоті профілем інструментальної рейки модулем 3 мм можна назначати кут ніжки зубця 15° . При чому технологія виготовлення таких фрез не потребує застосування спеціальної криволінійної правки заточного та затилювального шліфувального круга, яка використовується для забезпечення необхідної точності стандартних фрез.

РОЗДІЛ 2. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ЧЕРВ'ЯЧНОЇ ФРЕЗИ

2.1. Загальні вихідні дані

Для розрахунку економічної ефективності використання розробленої черв'ячної фрези в якості бази для порівняння прийнято способ обробки черв'ячного колеса на зубофрезерному верстаті моделі 5К32 стандартною черв'ячною фрезою за два проходи. Такий метод нарізання зуб'їв дозволяє досягти лише 8 ступінь точності оброблюваного черв'ячного колеса.

Використання проектної фрези з оптимальним поділенням профілю рейки дозволить нарізати зубці черв'ячного колеса за один прохід, збільшивши, тим самим, продуктивність обробки більше, ніж у 1,5 рази, а також підвищити на один ступінь точність обробки.

Розрахуємо річну потребу в інструменті за формулою:

$$k_i = \frac{N_d \cdot T_{\text{маш}} \cdot \kappa_{\text{вт}}}{t_e (1 + p)}, \quad (2.1)$$

де: N_d – річна програма виробництва деталей, шт./рік;

$T_{\text{маш}}$ – машинний час обробки однієї деталі, хв.;

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

t_e – економічна стійкість інструменту, хв.;

p – кількість переточок інструменту до повного зносу.

Потреба у черв'ячних фрезах:

– у базовому варіанті:

$$\kappa_{\text{с1}} = \frac{1000 \cdot 19,952 \cdot 1,08}{60 \cdot (10 + 1)} = 33 \text{ шт.}$$

– в проектному варіанті:

$$\kappa_{\delta 1} = \frac{1000 \cdot 11,79 \cdot 1,08}{60 \cdot (10+1)} = 20 \text{ шт.}$$

Потребу в зубофрезерних верстатах визначаємо за формулою:

$$Q_p = \frac{N_{\delta} \cdot T_{\text{нор}}}{F_{\text{орм}} \cdot 60 \cdot \kappa_{\epsilon}}, \quad (2.2)$$

де: $T_{\text{нор}}$ – штучний час обробки однієї деталі, хв.;

$F_{\text{орм}}$ – дійсний річний фонд часу роботи обладнання, год.;

κ_{ϵ} – коефіцієнт виконання норм (за даними підприємства).

Потреба у верстатах

– в базовому варіанті:

$$Q_p = \frac{1000 \cdot 39,904}{3980 \cdot 60 \cdot 1,01} = 0,17 \text{ (приймаємо 1 верстат)}$$

– в проектному варіанті:

$$Q_p = \frac{1000 \cdot 16,84}{3980 \cdot 60 \cdot 1,01} = 0,07 \text{ (} Q_{np}=1 \text{)}$$

Загальні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів зведено до табл.2.1.

Таблиця 2.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники базового та нового варіантів

№ п/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			базовий	проект
1	2	3	4	5
1.	Програма виробництва черв'ячних колес	шт./рік	1000	1000
2	Потреба у зубофрезерних верстатах	шт./рік	1	1
3.	Потреба у фрезах	шт./рік	33	20

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4	5
3.	Штучний час обробки деталі	хв.	39,904	16,84
4.	Площа, яку займає верстат	м ²	3,45	3,45
5.	Встановлена потужність електродвигунів	кВт	4,2	4,2
6.	Категорія ремонтної складності: механічної/електричної частин	УРО	20/9,5	20/9,5
7.	Розряд роботи верстатника	розряд	4	4
8.	Оптова ціна: – верстата – інструменту	грн. грн.	934000 14400	934000 –

2.2. Визначення витрат на підготовку виробництва

1. Витрати на проектування фрези визначаємо за формулою:

$$B_{пк} = H_{ор} \cdot T_{кон} \cdot Z_{сз}^к \cdot \left(1 + \frac{\kappa_{\partial}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_{\epsilon}, \quad (2.3)$$

де $H_{ор}$ – кількість найменувань оригінальних деталей, які входять до конструкції інструменту, шт.;

$T_{кон}$ – сумарна кількість годин на розробку усіх видів конструкторської документації, яка в середньому припадає на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

$Z_{сз}^к$ – середньогодинна заробітна плата конструктора, грн./год.;

κ_{∂} – додаткова заробітна плата конструктора, %;

B_c – відрахування на соціальні потреби (ЄСВ – єдиний соціальний внесок) від заробітної плати конструкторів, %;

H_{ϵ} – накладні витрати, грн. (визначаються в процентах від основної заробітної плати конструктора).

$$B_{пк} = 1 \cdot 22 \cdot 102,52 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 1 \cdot 22 \cdot 102,52 \cdot \frac{45}{100} = 4041,75 \text{ грн.}$$

Витрати на технологічну підготовку виробництва інструменту:

$$B_m = H_{op} \cdot T_{mex} \cdot Z_{cz}^m \cdot \left(1 + \frac{K_d}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_e, \quad (2.4)$$

де T_{mex} – сумарна трудомісткість технологічних робіт, які припадають на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

Z_{cz}^m – середньогодинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$B_m = 1 \cdot 19 \cdot 101,21 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 1 \cdot 19 \cdot 101,21 \cdot \frac{60}{100} = 3734,44 \text{ грн.}$$

2.3. Визначення витрат на виготовлення інструменту

Після визначення трудомісткості виготовлення проектного інструменту розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$Z_{op} = \sum_{i=1}^n C_{ri} \cdot T_i, \quad (2.5)$$

де n – кількість i -тих видів робіт;

C_{ri} – середньогодинна тарифна ставка робітників, які виконують i -й вид робіт з урахуванням умов праці, грн.

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах:

$$Z_{op}^{mex} = 7,5 \cdot 92,015 = 690,11 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_{yo} = \sum_{i=1}^n Z_{opi} \cdot \frac{\Pi_{pp_i}}{100}, \quad (2.6)$$

де $\Pi_{\text{пр}_i}$ – процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Так, витрати на утримання та експлуатацію обладнання на механічних роботах:

$$B_{\text{yo}}^{\text{мех}} = 690,11 \cdot \frac{280}{100} = 1932,32 \text{ грн.}$$

в) цехові витрати:

$$B_{\text{цех}} = \sum_{i=1}^n Z_{\text{оп}_i} \cdot \frac{\Pi_{\text{цр}_i}}{100}, \quad (2.7)$$

де $\Pi_{\text{цр}}$ – процент цехових витрат по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

$$B_{\text{цех}}^{\text{мех}} = 690,11 \cdot \frac{232}{100} = 1601,06 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати заносимо до табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Трудовісткість виготовлення та окремі види витрат, які включені до собівартості інструменту

Види робіт	Трудовісткість робіт н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн/год	Основна заробітна плата робітників $З_{ор}$, грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o , грн.		Загальноцехові витрати $K_{цех}$, грн.	
					%	грн.	%	грн.
Заготівельні	0,1	4	92,015	9,20	245	22,54	132	12,15
Механічні	7,5	4	92,015	690,11	280	1932,32	232	1601,06
Термічні	1,5	3	102,716	154,07	285	439,11	250	385,19
Всього	9,1	-	-	853,39	-	2393,97	-	1998,39

Повну собівартість фрези розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на підприємстві кошторисних та звітних калькуляцій базових конструкцій. Розрахунок виконуємо за формулою:

$$C_{\text{вир}} = M_o + M_d + \Pi_n + B_n + T_v - B_{zv} + E_{\text{тех}} + \Pi_{\text{тех}} + \\ + Z_{ор} + Z_{др} + B_c + Z_{цп} + B_{yo} + B_{цех} + B_{зав} + B_{ін} + B_{пв}, \quad (2.7)$$

де M_o , M_d – відповідно витрати на основні та допоміжні матеріали, грн.;

Π_n – покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств, грн.;

Розрахунок витрат на основні матеріали та покупні напівфабрикати зведено до табл. 2.3.

T_v – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

B_n – напівфабрикати власного виробництва, грн.;

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

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

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

B_c – відрахування на соціальні потреби (ЄСВ), грн.;

$Z_{\text{цп}}$ – відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення та інші спеціальні витрати, грн.;

$B_{\text{зав}}$ – загальнозаводські витрати, грн.;

$B_{\text{ін}}$ – інші виробничі витрати, грн.;

$B_{\text{пв}}$ – позавиробничі витрати, грн.

Таблиця 2.3

Склад матеріальних витрат на інструмент

№ п/п	Основні матеріали	Оди- ниця	Витрати (шт., кг)	Ціна, грн.	Витрати на виріб, грн.
1.	Сталь Р6М5	кг	1,92	390,0	748,80

Розрахунок собівартості зводимо до табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Повна собівартість та оптова ціна черв'ячної фрези

№ з/п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1	2	3	4	5
1.	Матеріали основні	M_o	табл. 2.3	748,80
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4% від M_o	29,95
3.	Зворотні відходи	$- B_{\text{зв}}$	6% від M_o	44,93
4.	Транспортно-заготівельні витрати	T_v	5% від ($M_o + M_d$)	31,15
5.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$P_{\text{тех}}, E_{\text{тех}}$	59,8% від $Z_{\text{ор}}$	510,33
6.	Всього матеріальні витрати			1275,30
7.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$Z_{\text{ор}}$	табл. 2.2	853,39
8.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$Z_{\text{др}}$	10% від $Z_{\text{ор}}$	85,34
9.	Відрахування в фонд соціального страхування	$B_{\text{сс}}$	22% від ($Z_{\text{ор}} + Z_{\text{др}}$)	206,52

1	2	3	4	5
10.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$Z_{\text{уп}}$	12,2% від $Z_{\text{ор}}$	104,11
11.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 2.2	2393,97
12.	Цехові витрати	$K_{\text{цех}}$	табл. 2.2	1998,39
14.	Загальнозаводські витрати	$K_{\text{зав}}$	221% від $Z_{\text{ор}}$	1885,99
15.	Інші виробничі витрати	$B_{\text{ін}}$	3,4% від $Z_{\text{ор}}$	29,02
16.	Виробнича собівартість	$C_{\text{вир}}$	$\Sigma(7 \div 15)$	8832,02
17.	Позавиробничі витрати	$K_{\text{пв}}$	1% від $C_{\text{вир}}$	88,32
18.	Повна собівартість	$C_{\text{пов}}$	$C_{\text{вир}} + K_{\text{пв}}$	8916,67
19.	Прибуток нормативний	$\Pi_{\text{н}}$	20% від $C_{\text{пов}}$	1783,33
20.	Оптова ціна інструменту	$\Pi_{\text{опт}}$	$C_{\text{пов}} + \Pi_{\text{н}}$	10700,0

Оптову ціну інструменту розраховуємо за формулою:

$$\Pi_{\text{опт}} = C_{\text{пов}} + \Pi_{\text{н}}$$

де $\Pi_{\text{н}}$ – нормативний прибуток, грн.

$$\Pi_{\text{н}} = \frac{P_{\text{с}} \cdot C_{\text{пов}}}{100}$$

де $P_{\text{с}}$ – встановлений рівень рентабельності верстату, %.

$$\Pi_{\text{н}} = \frac{20 \cdot 8916,67}{100} = 1783,33 \text{ грн.}$$

$$\Pi_{\text{опт}} = 8916,67 + 1783,33 = 10700 \text{ грн.}$$

2.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)

Розрахунок виконуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^m B_i, \quad (2.9)$$

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

B_3 – витрати на заробітну плату основну, додаткову та ЄСВ основних робітників, грн.;

B_e – витрати на силову електроенергію, грн.;

B_{md} – витрати на допоміжні матеріали, грн.;

B_p – витрати на ремонт обладнання, грн.;

B_n – витрати на утримання приміщення, грн.;

B_h – витрати на наладку, грн.;

B_a – витрати на амортизацію обладнання, грн.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальні потреби:

$$B_3 = C_r \frac{T_{\text{нор}}}{60} \cdot (1 + K_d) \cdot (1 + K_c), \quad (2.10)$$

де $T_{\text{нор}}$ – час обробки зубчастого колеса, хв.;

K_d, K_c – відповідно коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань на соціальні потреби (ЄСВ).

У базовому варіанті:

$$B_3^{\text{баз}} = 92,015 \cdot \frac{39,9}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 82,1169 \text{ грн.}$$

В проектному варіанті:

$$B_3^{\text{пр}} = 92,015 \cdot \frac{16,84}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 34,6579 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$B_{\text{е}} = \frac{N_{\text{в}} \cdot K_{\text{о}} \cdot K_{\text{Н}} \cdot K_{\text{д}}}{\eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{с}}} \cdot \frac{T_{\text{шт}}}{60} \cdot C_{\text{ел}}, \quad (2.11)$$

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

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

$K_{\text{Н}}$ – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (для зубообробних та фрезерних верстатів – 0,6...0,7);

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

$\eta_{\text{с}}$ – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів – 0,88;

$\eta_{\text{м}}$ – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства – 0,95;

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

$$B_{\text{ел}}^{\text{баз}} = \frac{4,2 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,5}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{39,9}{60} \cdot 18,1 = 11,8538 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{ел}}^{\text{баз}} = \frac{4,2 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,5}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{16,84}{60} \cdot 18,1 = 5,0026 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{мв}} = \frac{M_{\text{гв}} \cdot R_{\text{м}} \cdot T_{\text{шт}}}{60 \cdot 100} \cdot K_{\text{п}}, \quad (2.12)$$

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 $K_{\text{п}} = 1$).

$$B_{\text{дм}}^{\text{баз}} = \frac{79,5 \cdot 20 \cdot 39,9}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 10,5746 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{дм}}^{\text{баз}} = \frac{79,5 \cdot 20 \cdot 16,84}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 4,4626 \text{ грн.}$$

Витрати на експлуатацію універсального ріжучого інструменту:

$$B_{ip} = \frac{(S_u + p \cdot S_{\text{пер}}) \cdot T_{\text{маш}}}{t_e (p + 1)} K_{\text{вт}}, \quad (2.13)$$

де S_u – первісна вартість універсального ріжучого інструменту, грн.;

p – кількість переточок ріжучого інструменту до повного зносу по лімітуючому розміру ріжучої грані;

$S_{\text{пер}}$ – вартість однієї переточки, грн.;

t_e – економічна стійкість інструменту, хв. (для пуансона – кількість ударів);

$K_{\text{вт}}$ – коефіцієнт обліку втрат інструменту.

$$B_{ip}^{\text{баз}} = \frac{(14400 + 10 \cdot 119,7) \cdot 19,952}{60 \cdot (10 + 1)} \cdot 1,08 = 509,2218 \text{ грн.}$$

$$B_{ip}^{\text{баз}} = \frac{(10700 + 10 \cdot 119,7) \cdot 11,79}{60 \cdot (10 + 1)} \cdot 1,08 = 229,7187 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_p = \frac{R_{\text{м}} \cdot \Gamma_{\text{вм}} + R_{\text{е}} \cdot \Gamma_{\text{ве}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (2.14)$$

де $\Gamma_{\text{вм}}, \Gamma_{\text{ве}}$ – 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.).

$$B_p^{\text{баз}} = \frac{(20 \cdot 980 + 9,5 \cdot 750) \cdot 39,9}{3950 \cdot 60} = 4,4993 \text{ грн.}$$

$$B_p^{\text{баз}} = \frac{(20 \cdot 980 + 9,5 \cdot 750) \cdot 16,84}{3950 \cdot 60} = 1,8989 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{уп}} = \frac{F_o \cdot K_d \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (2.15)$$

де F_o – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, м^2 ;

K_d – 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

$$B_{\text{уп}}^{\text{баз}} = \frac{3,45 \cdot 3,5 \cdot 39,9}{3950 \cdot 60} \cdot 780 = 1,5858 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{уп}}^{\text{баз}} = \frac{3,45 \cdot 3,5 \cdot 16,84}{3950 \cdot 60} \cdot 780 = 0,6692 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію верстата:

$$B_a = \frac{\Phi_{\text{бал}} \cdot H_a}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (2.16)$$

де H_a – норма амортизації, %;

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

Балансову вартість верстату 5К32 знайдемо за формулою:

$$\Phi_{\text{бал}} = \Pi_{\text{опт}} \cdot (1 + K_{\text{тр}} + K_{\text{м}} + K_{\text{ф}}), \quad (2.17)$$

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

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

$$\Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}} = 934000 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,05) = 1111460 \text{ грн.},$$

$$B_a^{\text{баз}} = \frac{1111460 \cdot 20 \cdot 39,9}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 37,4238 \text{ грн.},$$

$$B_a^{\text{баз}} = \frac{1111460 \cdot 20 \cdot 16,84}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 15,7949 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Заробітна плата основна, додаткова з ЄСВ	B_z	82,1169	34,6579
2.	Силова електроенергія	$B_{\text{ел}}$	11,8538	5,0026
3.	Допоміжні матеріали	$B_{\text{дм}}$	10,5746	4,4626
4.	Ремонт обладнання	B_p	4,4993	1,8989
5.	Універсальний ріжучий інструмент	B_{ip}	509,2218	229,7187
6.	Утримання приміщення	$B_{\text{уп}}$	1,5858	0,6692
7.	Амортизація обладнання	B_a	37,4238	15,7949
Загальна сума		B_e	657,276	292,205

2.5. Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект, який отримує виробник інструменту, розраховуємо за формулою:

$$E_{\text{рв}} = (C_{\text{опт}}^{\text{пр}} - C_{\text{пов}}^{\text{пр}}) \cdot \Pi_{\text{в}} - E_{\text{н}} \cdot K_{\text{в}}, \quad (2.18)$$

де $C_{\text{опт}}^{\text{пр}}$ – оптова ціна проектного інструменту, грн.;

$C_{\text{пов}}^{\text{пр}}$ – повна собівартість проектного інструменту, грн.;

$\Pi_{\text{в}}$ – програма виробництва інструментів, шт./рік;

$E_{\text{н}}$ – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень ($E_{\text{н}} = 0,16$);

K_{ϵ} – додаткові капітальні витрати у виробника, грн.

$$K_{\epsilon} = B_{нк} + B_m, \quad (2.19)$$

де $B_{нк}, B_m$ – відповідно вартість конструкторської та технологічної підготовки виробництва інструменту, грн.

$$K_{\epsilon} = 4041,75 + 3734,44 = 7776,19 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{рв}} = (10700 - 8916,67) \cdot 20 - 0,16 \cdot 7776,19 = 34500 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект у споживача розрахуємо за формулою:

$$E_{\text{рсп}} = (B_{\epsilon}^{\text{баз}} - B_{\epsilon}^{\text{пр}}) \cdot N_{\text{д}} - E_{\text{н}} \cdot K_{\text{сп}}, \quad (2.20)$$

де $N_{\text{д}}$ – річна програма випуску черв'ячного колеса, шт.;

$K_{\text{сп}}$ – додаткові капітальні витрати у споживача, грн.

$$K_{\text{сп}} = \Pi_i^{\text{пр}} \cdot K_i^{\text{пр}} - \Pi_i^{\delta} \cdot K_i^{\delta}, \quad (2.21)$$

$\Pi_i^{\text{пр}}, \Pi_i^{\delta}$ – вартість інструменту відповідно в проектному і базовому варіантах, грн.;

$K_i^{\text{пр}}, K_i^{\delta}$ – потреба в інструменті відповідно в проектному і базовому варіантах, шт./рік.

$$K_{\text{сп}} = 10700 \cdot 20 - 14400 \cdot 33 = -261200 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{рсп}} = (657,276 - 292,205) \cdot 1000 - 0,16 \cdot (-29000) = 406900 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень у виробника

$$T_{\text{окв}} = \frac{K_{\epsilon}}{(\Pi_{\text{опт}}^{\text{пр}} - C_{\text{пов}}^{\text{пр}}) \cdot \Pi_{\text{в}}} = \frac{7776,19}{(10700 - 8916,67) \cdot 20} = 0,22 \text{ року} = 2,6 \text{ міс.}, \quad (2.22)$$

У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників проекту (табл. 2.6).

Таблиця 2.6

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показники	Одини ця	Базовий варіант	Проект	Зміна, % (+, -)
1.	Програма виготовлення зубчастих коліс (умовна)	шт/рік	1000	1000	—
2.	Потреба у черв'ячних фрезах	шт/рік	33	20	-39,4
3.	Час на обробку зубчастого колеса:				
	— машинний	хв.	19,952	11,79	-40,9
	— штучний	хв.	39,904	13,419	-66,4
4.	Оптова ціна інструменту:	грн.	14400,0	10700,0	-25,7
5.	Технологічна собівартість обробки зубчастого колеса	грн.	657,276	292,205	-55,5
6.	Капітальні витрати на конструкторську та технологічну підготовку виробництва	грн.	—	7776	—
7.	Річний економічний ефект:				
	— у виробника		—	34500	—
	— у споживача	грн.	—	406900	—
8.	Строк окупності додаткових капітальних вкладень у виробника	міс.	—	2,6	—

ВИСНОВКИ

У даній дипломній роботі магістра розв'язане важливе науково-технічне завдання визначення раціональних параметрів інструментальної рейки черв'ячної фрези з урахуванням рівномірного припуску при обробці, при яких не відбувається підрізання профілю зубців колеса сформованих на попередніх проходах.

При розв'язанні даного завдання вирішено наступні задачі:

- розроблено математичні моделі, які описують вихідний формоутворюючий профіль;

- розроблено математичні моделі процесу формоутворення черв'ячних коліс з урахуванням рівномірного припуску при обробці, який здійснюється за рахунок застосування черв'ячних фрез з поділенням профілем інструментальної рейки по висоті на три частини між фрезами для трьох послідовних проходів.

- визначено раціональні параметрів інструментальної рейки черв'ячної фрези з урахуванням рівномірного припуску при обробці, при яких не відбувається підрізання профілю зубців колеса сформованих на попередніх проходах.

Розроблено методику математичного опису вихідних формоутворюючих профілей, яка дозволяє проаналізувати послідовне формоутворення черв'ячного колеса черв'ячною фрезою з поділенням на три частини по висоті профілем інструментальної рейки.

На основі теорії відображення афінного простору встановлено оптимальні кути ніжки зубця фрези для другого та третього проходів які знаходяться в діапазоні $14^0 - 15^0$, та величини перекриття профілю яке становить 0,25 m.

Черв'ячні фрези з поділенням на три частини по висоті профілем інструментальної рейки для обробки черв'ячних коліс методом тангенціальної подачі з урахуванням рівномірного припуску при обробці мають:

а) число зубців в 1,8...2,2 рази вище за відповідний параметр, що рекомендується для стандартних черв'ячних фрез відповідно до ГОСТ 9324-80Е;

б) задні кути на вершинному ріжучому лезі, що близькі до оптимальних значень 7° ... 9° , рекомендованих для обробки бронзових вінців черв'ячних коліс;

в) задні кути на бокових ріжучих лезах мінімальні у фрези для третього проходу і знаходяться в межах $2,31^{\circ}$... $4,53^{\circ}$, що є прийнятним.

Використання проєктної фрези з оптимальним поділенням профілю рейки дозволить нарізати зубці черв'ячного колеса за один прохід, збільшивши, тим самим, продуктивність обробки більше, ніж у 1,5 рази, а також підвищити на один ступінь точність обробки.

Очікуваний економічний ефект від впровадження фрези з поділеним профілем інструментальної рейки становить: у виробника 34500 грн.; у споживача 406900 грн. Строк окупності капітальних вкладень у виробника 2,6 місяців.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Модульно-параметричний принцип розробки проектів шестеренних гідравлічних машин. / Апаракін А.Р. // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - Вип. 7 (38). – С. 51-58.
2. Валявський, І. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою : навч. посіб. / І. А. Валявський, О. В. Лисенко, І. А. Лисенко ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 281 с.
3. Shcherbyna K. Kinematics of cutting process while honing holes with a hone with variable geometry of sticks / K. Shcherbyna, A. Hrechka, V. Mazhara, T. Diachenko//Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 2020. – Вип.50. – С.159-164
4. 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.
5. Годунко М.О. Розробка методики силового розрахунку вертикально орієнтованого захватного пристрою / М.О. Годунко, О.А. Кислун, В.А. Мажара, В.К. Щербина, Р.А. Кравченко, В.В. Ключкін // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - Вип. 7 (38). – С. 27-33.
6. Годунко М.О. Дослідження можливості підвищення точності захватного пристрою робота за рахунок компенсуючої ланки затискного важеля. Годунко М.О., Мажара В.А., Кислун О.С., Щербина В.К., Писанка С.В. // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки : зб. Наук пр. – Хмельницький : ХНУ, 2024. – Вип. №3. – С. 52-56.
7. Kyrychenko A. The principle of contradiction in scientific and pedagogical research on AI (methodological aspect) / A. Kyrychenko, Z. Stezhko // Вісник

- Львівського університету. Серія філос.-політолог. студії. - Львів: Видавничий дім «Гельветика», 2024. – Вип. 53. – С. 78-85.
8. Апаракін А.Р. Синтез схем навантаження силових елементів кулькогвинтового гідропідсилювача з аксіальною структурою приводу / А.Р. Апаракін, П.М. Єрьомін, В.А. Мажара // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. – Кропивницький: ЦНТУ, 2024. – Вип. 9 (40). - Ч. II. – С. 23-31.
9. 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.
10. Кириченко А. М. Аналіз кінематики верстата з двохкоординатним механізмом паралельної структури "біпод" / А. М. Кириченко, Л. В. Ленченко, С. М. Заїка // Вісник Тернопільського державного технічного університету. - Тернопіль : ТДТУ, 2008. - № 2. - С. 74-81
11. Кириченко А. М. Дослідження кінематики трьохкоординатного верстата з комбінованою структурою / А. М. Кириченко, С. М. Заїка, Л. В. Ленченко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград : КНТУ, 2008. - Вип. 20. - С. 97-103.
12. Кириченко А. М. Визначення силових характеристик приводів обладнання з механізмами паралельної структури / А. М. Кириченко, С. М. Заїка // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. - Кременчук : КДПУ, 2008. - Вип. 5 (52), ч. 2. - С. 50-53.
13. Заїка С. М. Точність верстатів із плоскими механізмами паралельної структури / С. М. Заїка, А. М. Кириченко // Вісник Сумського державного університету. Серія "Технічні науки". - Суми : СумДУ, 2010. - № 4. - С. 19-23.

14. Кириченко А. М. Особливі положення плоских механізмів паралельної структури / А. М. Кириченко, С. М. Заїка, А. М. Федотьев // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. - Кременчук : КДУ, 2010. - Вип. 5 (64), ч. 1. - С. 94-99.
15. Щербина К. Динамічний аналіз кульково-клинового хону в зоні малих переміщень / Щербина К., Мажара В., Торчілов Д., Заїка С., Масляніков В. // Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки. - Хмельницький: ХНУ, 2024. - №3 (337). - С.250-254.
16. Щербина К., Мажара В., Торчілов Д., Заїка А., Масляніков В. Дослідження повздовжньої сталості пружно-гвинтового хону з гвинтовими канавками // Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки. - Хмельницький: ХНУ, 2025. - №2 (349). - С.493-499.
17. Щербина К., Заїка А., Заїка С., Мажара В., Скібінський Я. Управління точністю нарізання черв'ячних коліс збірними черв'ячними фрезами з поділенням на дві частини профілем інструментальної рейки // Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки. - Хмельницький: ХНУ, 2025. - №2 (349). - С.364-370.
18. Заїка, С., Заїка, А., Лисенко, О., & Скібінський, Я. (2025). Підвищення ефективності обробки отворів корпусних деталей із чавуну деформуючим протягуванням. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 357(5.1), 167-174.
19. Економічні розрахунки організаційно-планові розрахунки при розробці нових виробів. – Кіровоград: КДТУ, 2001. – 36 с.
20. Планування діяльності підприємства. Методичні вказівки з використання сітєвих методів в плануванні діяльності підприємства. – Кіровоград: КДТУ, 2002. – 30 с.