

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра “Машинобудування, мехатроніки і робототехніки”

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри

Машинобудування, мехатроніки і
робототехніки

канд. техн. наук, доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

«_____» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему:

**Принципи та механізми реалізації інтерполяційного точіння
на фрезерних верстатах з ЧПК**

Виконав здобувач вищої освіти

4 курсу групи ПМ-22-3

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

спеціальності 131 «Прикладна механіка»

_____ Максим МАРЧЕНКО

Керівник роботи: канд. техн. наук, доцент

_____ Олександр ЛИСЕНКО

Рецензент: канд. техн. наук, доцент

_____ Олег БЕВЗ

Кропивницький 2026

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри машинобудування,
 мехатроніки і робототехніки
 канд. техн. наук, доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА
 «___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

За першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
Марченку Максиму Федоровичу

Тема роботи:

Принципи та механізми реалізації інтерполяційного точіння на фрезерних верстатах з ЧПК

Керівник роботи:

канд. техн. наук, доцент Олександр Лисенко

Затверджено наказом ЦНТУ від 01 квітня 2026 року № 199-02.

Строк подання роботи до захисту:

10 червня 2026 р.

Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Мета: обґрунтування оптимальних стратегій інтерполяційного точіння для підвищення точності та якості обробки несиметричних деталей на верстатах із ЧПК

Завдання:

- проаналізувати технологічну ефективність застосування інтерполяційного точіння для обробки несиметричних деталей за одну установку;
- провести порівняльне дослідження впливу лінійної та кругової інтерполяції на шорсткість поверхні та вібростійкість процесу;
- оптимізувати параметри CAD/CAM-програмування та величини допусків для забезпечення балансу між точністю форми та часом обробки;
- оцінити можливості скорочення номенклатури інструменту та витрат завдяки гнучкості інтерполяційних траєкторій;
- визначити технічні вимоги до систем ЧПК щодо синхронізації лінійних осей зі шпинделем верстата.
- виконати порівняльний аналіз доцільності використання інтерполяційного точіння замість традиційних розточувальних операцій;
- визначити технологічні обмеження методу, пов'язані з потужністю шпинделя, складністю програмування та обробкою малих отворів.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання роботи	Примітка
1	Опрацювання літератури за тематикою роботи	квітень 2026	
2	Виконання загальної частини	квітень 2026	
3	Виконання технологічної частини	травень 2026	
4	Виконання конструкторської частини	травень 2026	
5	Розробка креслеників	травень 2026	
6	Усунення недоліків після перевірки керівником роботи	травень 2026	
7	Перевірка роботи на академічний плагіат	червень 2026	
8	Рецензування роботи	червень 2026	
9	Захист кваліфікаційної роботи	червень 2026	

Дата видачі завдання: «02» квітня 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____

Максим МАРЧЕНКО

Керівник роботи _____

Олександр ЛИСЕНКО

АНОТАЦІЯ

Марченко, М.Ф. Принципи та механізми реалізації інтерполяційного точіння на фрезерних верстатах з ЧПК: кваліфікаційна бакалаврська робота : спец. 131 Прикладна механіка / наук. кер. О. В. Лисенко; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2026.– 41 с.

Креслеників – разом 3 аркуші формату А1.

Метою роботи є обґрунтування оптимальних стратегій інтерполяційного точіння для підвищення точності та якості обробки несиметричних деталей на верстатах із ЧПК.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності обробки складнопрофільних та несиметричних деталей (корпусів клапанів, колекторів, патрубків), які важко або неможливо закріпити на традиційних токарних верстатах.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці та обґрунтуванні комплексних технологічних рекомендацій щодо впровадження методу інтерполяційного точіння у виробничий процес машинобудівних підприємств, що дозволяє суттєво підвищити ефективність обробки складних деталей.

Ключові слова: інтерполяційне точіння, програмування верстатів з ЧПК, CAD/CAM системи, якість поверхні, гвинтова інтерполяція.

ANNOTATION

Marchenko Maksym. Principles and mechanisms for implementing interpolation turning on CNC milling machines: Specialty 131 Applied Mechanics/Scientific Adviser O.V. Lysenko; Central Ukrainian National Technical University - Kropyvnytskyi: CNTU, 2026.– 41 p.

Drawings - 3 A1 sheets in total.

The purpose of the work is to substantiate optimal interpolation turning strategies to improve the accuracy and quality of machining of asymmetric parts on CNC machines.

The relevance of the work is due to the need to increase the efficiency of processing complex and asymmetric parts (valve housings, manifolds, pipes), which are difficult or impossible to fix on traditional lathes.

The practical significance of the results obtained lies in the development and substantiation of comprehensive technological recommendations for the implementation of the interpolation turning method in the production process of machine-building enterprises, which allows significantly increasing the efficiency of processing complex parts.

Keywords: interpolation turning, CNC machining programming, CAD/CAM systems, surface quality, helical interpolation.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра “Машинобудування, мехатроніки і робототехніки”

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи на тему:

**Принципи та механізми реалізації інтерполяційного точіння на фрезерних
верстатах з ЧПК**

КРБ.ПМ.26.39.13.00.00

Виконав здобувач вищої освіти
4 курсу групи ПМ-22-3
ОПП «Комп'ютерний інжиніринг технологій,
робототехніка і 3D-друк»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
_____ Максим МАРЧЕНКО

Керівник роботи:
канд. техн. наук, доцент
_____ Олександр ЛИСЕНКО

Кропивницький 2026

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ	10
1.1. Загальна характеристика методу інтерполяційного точіння.....	10
1.2. Існуючі методи, що реалізують інтерполяційного точіння.....	12
1.2.1. Лінійна та кругова інтерполяція	12
1.2.2. Гвинтова (гелікоїдальна) інтерполяція	13
1.2.3. Полярна інтерполяція (G12.1)	14
1.2.4. Еліптичне точіння	15
1.3. Особливості лінійної, кругової та гвинтової інтерполяції	15
1.4. Порівняння гвинтової інтерполяції з традиційним свердлінням отворів	16
1.5. Загальна концепція інтерполяційного точіння	18
РОЗДІЛ 2. РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ НА СУЧАСНИХ ОБРОБНИХ ЦЕНТРАХ	21
2.1. Вплив інтерполяції на якість поверхні та точність при обробці.....	21
2.2. Роль системи ЧПК та необхідність синхронізації осей	24
2.3. Програмування в режимі полярної інтерполяції (G12.1)	25
2.4. Налаштування інструмента	26
2.5. Розрахунок швидкості подачі (F1 та F2)	27
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ІНТЕРПОЛЯЦІЙНОГО ТОЧІННЯ ПРИ ОБРОБЦІ ДЕТАЛЕЙ	28
3.1. Рекомендації щодо вибору інструментального оснащення	28
3.2. Оптимізація параметрів САМ-програмування та допусків.....	29
3.3. Методика розрахунку швидкості подачі для геометричної точності	30
3.4. Особливості обробки сталі VP50	32
3.5. Реалізація методів на сучасних обробних центрах	33
3.6. Приклади реалізації програм обробки різних методів інтерполяції.....	34
ВИСНОВКИ	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	39

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку машинобудівної галузі характеризується впровадженням багатофункціонального обладнання та інтегрованих CAD/CAM-систем, що дозволяють підвищити ефективність виробництва складних деталей. Одним із перспективних та інноваційних методів обробки на сучасних вертикальних обробних центрах та багатозадачних верстатах є інтерполяційне точіння.

Традиційні методи токарної обробки вимагають обертання заготовки навколо своєї осі симетрії, що створює певні технологічні труднощі в процесі роботи з великогабаритними, важкими або несиметричними деталями, такими як корпуси клапанів, блоки колекторів або складні патрубки. Встановлення таких компонентів на стандартні токарні верстати потребує складних пристосувань для балансування та фіксації, що збільшує час підготовки виробництва та знижує загальну точність через необхідність додаткових переустановлень.

Інтерполяційне точіння дозволяє імітувати токарну операцію на 3-осьовому фрезерному верстаті, де заготовка залишається нерухомою, а різальний інструмент здійснює складний рух, що поєднує кругову інтерполяцію за осями X та Y з синхронізованим обертанням шпинделя. Це забезпечує можливість повної обробки компонента за одну установку, що є критично важливим для забезпечення концентричності та високої якості поверхонь.

Актуальність даної теми також зумовлена необхідністю оптимізації інструментального забезпечення. Метод дозволяє використовувати модульні інструментальні рішення замість дорогих розточувальних головок з віссю W , що суттєво знижує капітальні витрати на інструмент. Крім того, застосування гвинтової (гелікоїдальної) інтерполяції дозволяє одним інструментом створювати отвори різних діаметрів, забезпечуючи при цьому краще відведення стружки та менше навантаження на раму верстата порівняно з традиційним свердлінням великих діаметрів.

Практичний інтерес представляє також дослідження впливу стратегій інтерполяції (лінійної проти кругової) та програмних допусків на якість обробки важкооброблюваних матеріалів, таких як сталь VP50 з бейнітно-мартенситною мікроструктурою. Вибір оптимального типу інтерполяції та налаштування

параметрів у САМ-системах безпосередньо впливає на шорсткість поверхні (R_a , R_z) та геометричну точність деталей, що є визначальним фактором їхньої експлуатаційної надійності та конкурентоспроможності.

Таким чином, розробка та впровадження методик інтерполяційного точіння є важливою задачею прикладної механіки, що спрямована на цифровізацію виробництва, підвищення точності обробки та зниження собівартості складнопрофільних деталей в умовах сучасного машинобудування.

Метою роботи є обґрунтування оптимальних стратегій інтерполяційного точіння для підвищення точності та якості обробки несиметричних деталей на верстатах із ЧПК.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Проаналізувати технологічну ефективність застосування інтерполяційного точіння для обробки несиметричних деталей за одну установку.
2. Провести порівняльне дослідження впливу лінійної та кругової інтерполяції на шорсткість поверхні та вібростійкість процесу.
3. Оптимізувати параметри CAD/CAM-програмування та величини допусків для забезпечення балансу між точністю форми та часом обробки.
4. Оцінити можливості скорочення номенклатури інструменту та витрат завдяки гнучкості інтерполяційних траєкторій.
5. Визначити технічні вимоги до систем ЧПК щодо синхронізації лінійних осей зі шпинделем верстата.
6. Виконати порівняльний аналіз доцільності використання інтерполяційного точіння замість традиційних розточувальних операцій.
7. Визначити технологічні обмеження методу, пов'язані з потужністю шпинделя, складністю програмування та обробкою малих отворів.

Об'єктом дослідження є процеси інтерполяційної обробки складних несиметричних деталей на багатоцільових верстатах із ЧПК.

Предметом дослідження є вплив інтерполяції та CAD/CAM-допусків на шорсткість і геометричну точність оброблених поверхонь.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності обробки складнопрофільних та несиметричних деталей (корпусів клапанів, колекторів, патрубків), які важко або неможливо закріпити на традиційних токарних верстатах.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці та обґрунтуванні комплексних технологічних рекомендацій щодо впровадження методу інтерполяційного точіння у виробничий процес машинобудівних підприємств, що дозволяє суттєво підвищити ефективність обробки складних деталей.

Апробація роботи. Основні результати та можливості практичного застосування результатів випускової кваліфікаційної роботи були представлені на LVII науково-технічній конференції «Наука в ЦНТУ: основні досягнення та перспективи розвитку» за підсумками проведення «Дня науки – 2026» (22-23 квітня 2026 року, Кропивницький: ЦНТУ) [17].

<https://kntu.kr.ua/file/content/53878/zbirnyk-tez-dopovidei-lvii-naukovo-tekhnichnoi-konferentsii-zdobuvachiv-vyshchoi-osvity-nauka-vyrobnytstvu-2026-za-pidsumkamy-provedennia-dnia-nauky-2026-22-23-kvitnia-2026-roku.pdf#page=94>

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ

1.1. Загальна характеристика методу інтерполяційного точіння

В основі сучасних технологій обробки на верстатах із ЧПК лежить принцип інтерполяції – здатності системи керування генерувати проміжні точки траєкторії руху інструмента між двома заданими координатами [1].

Інтерполяційне точіння – це метод обробки для сучасних обробних центрів та багатозадачних верстатів, при якому токарна операція виконується шляхом циклічної інтерполяції осей X та Y у круговому напрямку при одночасному обертанні шпинделя верстата синхронно з контуром обертання (рис. 1.1).

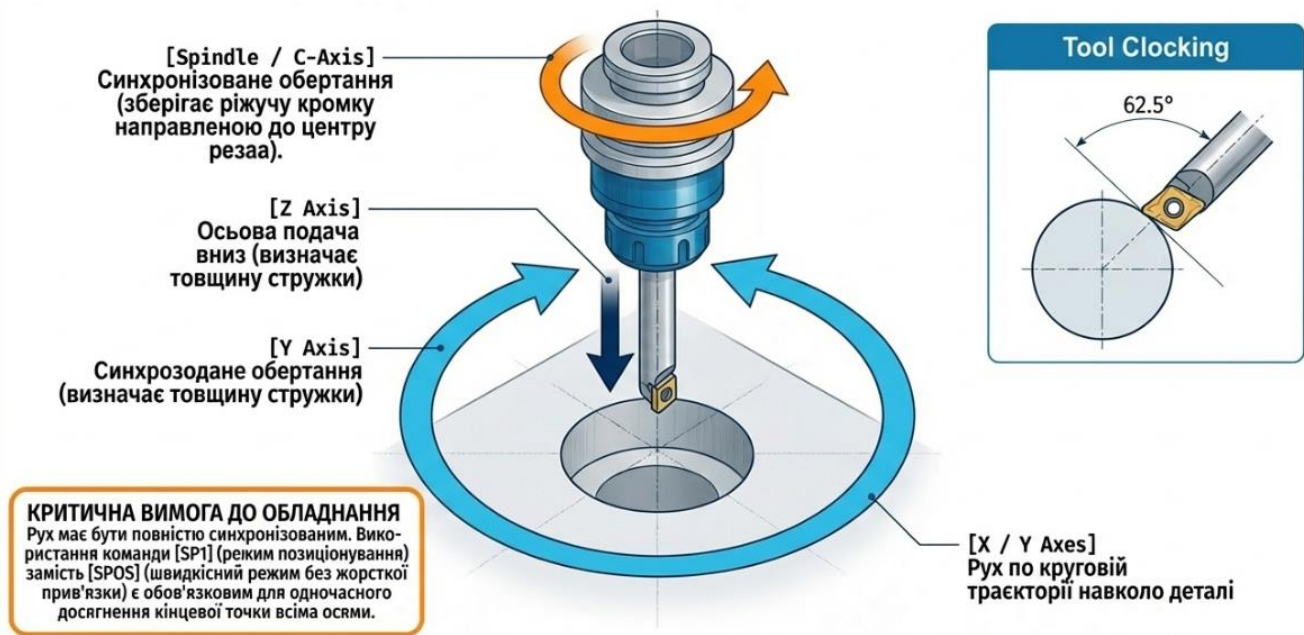


Рисунок 1.1 – Загальна схема інтерполяційного точіння

Розглянемо основні особливості та переваги цього методу.

Механізм роботи. На відміну від традиційного точіння, де заготовка обертається навколо своєї осі, при інтерполяційному точінні деталь залишається нерухомою, а обертається інструмент. Це дозволяє 3-осьовому фрезерному верстату імітувати траєкторію руху токарного верстата.

Синхронізація. Для виконання цієї операції необхідна здатність системи ЧПК синхронізувати рух шпинделя з лінійними осями (X, Y, Z).

Типи операцій. Метод дозволяє обробляти зовнішні діаметри, внутрішні діаметри, торці, а також виконувати як чорнову, так і чистову обробку.

Переваги інтерполяційного точіння:

- обробка великих та несиметричних деталей. Це ідеальне рішення для обробки симетричних елементів (фланців, канавок, отворів) на великих, несиметричних деталях, які важко або неможливо закріпити в патроні токарного верстата;

- обробка за одну установку: Компонент може бути повністю оброблений без зміни його положення або перевстановлення, що підвищує точність і економить час;

- економія на обладнанні та інструментах. Дозволяє використовувати стандартні обробні центри замість спеціалізованих розточувальних верстатів або дорогих розточувальних головок з віссю W. Знижує витрати на інструменти завдяки використанню модульних рішень. Один інструмент може створювати отвори різних діаметрів, що зменшує потребу в широкому асортименті сверدل;

- висока стабільність та якість. Використання кругової інтерполяції забезпечує вищу стабільність процесу та менші відхилення форми порівнянні з лінійною інтерполяцією. Також цей метод створює менше навантаження на шпиндель верстата, ніж важке свердління великих отворів.

Хоча інтерполяційне точіння не може повністю конкурувати за швидкістю з традиційним точінням або розточуванням, воно є ефективною альтернативою в ситуаціях, де важлива гнучкість і можливість обробки складних деталей без додаткових переустановлень та перезакріплень.

У контексті інтерполяційного точіння та фрезерування виділяють кілька основних методів, кожен з яких має свої особливості, переваги та сфери застосування.

1.2. Існуючі методи, що реалізують інтерполяційного точіння

1.2.1. Лінійна та кругова інтерполяція

Лінійна інтерполяція (G01) є найпростішою формою руху, при якій інструмент переміщується по прямій лінії між двома точками [1]. Хоча цей метод є універсальним, у складних операціях точіння на фрезерних верстатах він може створювати певну дискретність руху. Це часто призводить до виникнення вібрацій та підвищеного зносу інструмента [2]. Як показують дослідження, при обробці твердих сталей лінійна інтерполяція може давати незадовільну якість поверхні саме через ці динамічні ефекти [3].

Натомість кругова інтерполяція (G02/G03) забезпечує рух інструмента по дузі або колу [1]. Цей метод є значно ефективнішим для токарних операцій на обробних центрах, оскільки він забезпечує плавність траєкторії, зменшує механічне напруження на вузли верстата та інструмент і дозволяє мінімізувати відхилення форми [2, 4]. Практичні експерименти підтверджують, що використання кругової інтерполяції дозволяє досягти вищої стабільності процесу та точності геометричних параметрів деталі [5, 6].

На рис. 1.2. наведено різницю між апроксимацією кривої дрібними прямими відрізками (G01), що може спричиняти вібрації, та плавним рухом по дузі (G02/G03), який забезпечує кращу якість поверхні та стабільність процесу.

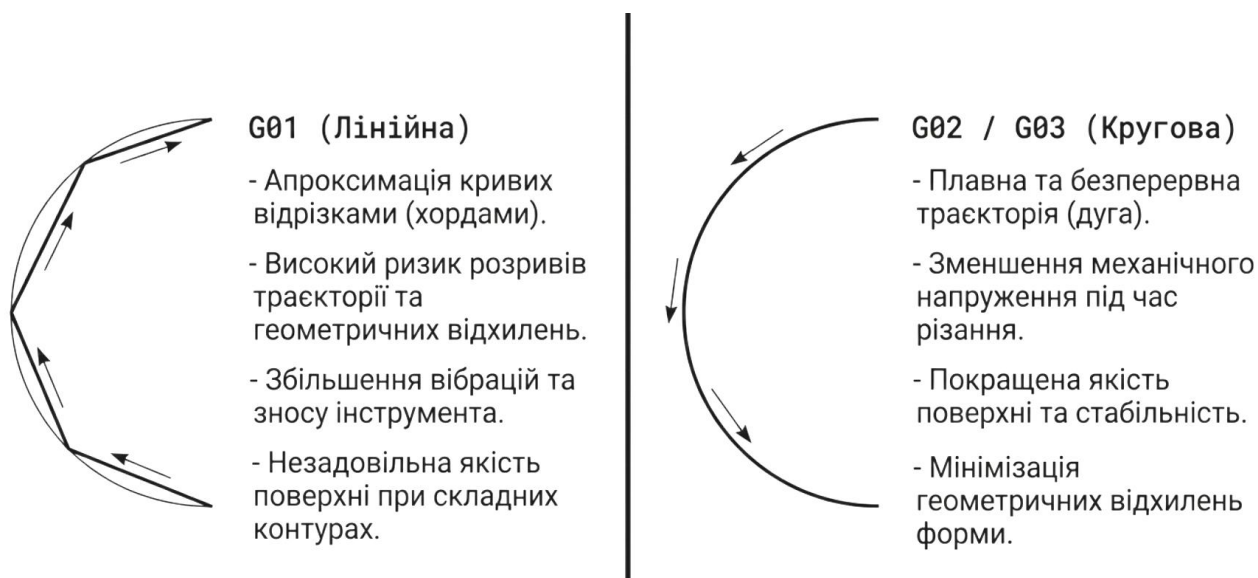


Рисунок 1.2 – Порівняльна схема траєкторій лінійної та кругової інтерполяції

1.2.2. Гвинтова (гелікоїдальна) інтерполяція

Гвинтова інтерполяція – це вдосконалений метод обробки, який поєднує круговий рух у площині (осі X та Y) з одночасним лінійним переміщенням за віссю Z [7, 8]. Інструмент рухається за спіральною траєкторією, нагадуючи рух по гвинтових сходах [8].

Цей метод має низку суттєвих переваг над традиційним свердлінням:

- універсальність: одна фреза меншого діаметра може створювати отвори різних розмірів, що значно скорочує витрати на інструментальний парк [9, 10];
- видалення стружки: завдяки тому, що діаметр інструмента менший за діаметр отвору, залишається вільний простір для ефективного відведення стружки, що критично важливо при обробці глибоких отворів або в'язких матеріалів [9, 10].
- зниження навантаження: розподіл сил різання на три осі дозволяє виконувати важкі операції розточування навіть на верстатах із обмеженою потужністю шпинделя [11].

На рис. 1.3. показано принцип формування отвору шляхом одночасного кругового руху інструмента в площині X - Y та безперервного лінійного заглиблення за віссю Z , що нагадує рух по спіралі.

Кінематика гвинтової інтерполяції

Базовий принцип: Круговий рух у площині X - Y (G02/G03) із синхронним лінійним переміщенням по осі Z .

Застосування:

- Розточування отворів великого діаметра.
- Створення внутрішньої/зовнішньої різьби.

Переваги:

- Менше радіальне навантаження на інструмент.
- Плавний вхід та вихід з матеріалу.
- Ефективне відведення стружки.

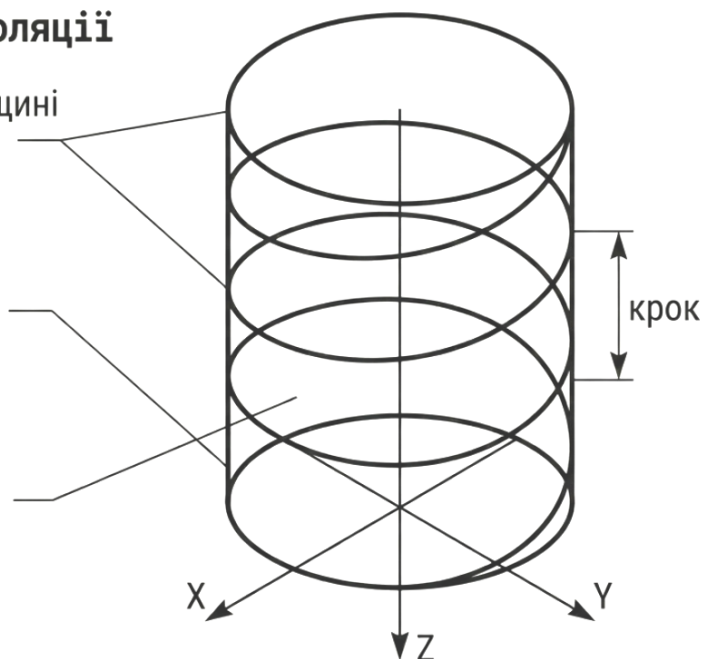


Рисунок 1.3 – Кінематична схема гвинтової (гелікоїдальної) інтерполяції

1.2.3. Полярна інтерполяція (G12.1)

Окремим важливим методом є полярна інтерполяція, яка реалізується за допомогою функції G12.1 на токарних центрах із приводним інструментом (вісь С) [12, 13]. Цей метод дозволяє програмувати обробку на торці деталі у декартових координатах (подібно до площини X-Y), які система ЧПК автоматично перетворює на полярні (радіус та кут обертання) [12, 14].

При полярній інтерполяції вісь С розглядається не як поворотна, а як віртуальна лінійна вісь [3]. Це значно спрощує програмування складних геометричних форм, таких як еліпси, шестигранники або пази з округленими кутами на торцевих поверхнях [12, 13]. Основним обмеженням методу є необхідність точної синхронізації швидкості обертання поворотної осі з лінійними переміщеннями, особливо при наближенні інструмента до центру заготовки (X0, C0), де швидкість обертання може стати критично високою [3].

Схема на рис. 1.4 пояснює принцип полярної інтерполяції, де поворотна вісь С розглядається як віртуальна лінійна вісь, що дозволяє програмувати складні контури на торці деталі в декартових координатах.

Трансформація декартових координат у полярні

- **Функція:** G12.1 дозволяє програмувати форму на торці деталі за допомогою декартових координат.
- **Вісь X:** Горизонтальна відстань (програмується на діаметр).
- **Вісь С:** Віртуальна лінійна вісь (фактична вертикальна відстань від центру).
- **Базова площина:** G18 (X-Z) є площиною за замовчуванням для G12.1 на токарних центрах.

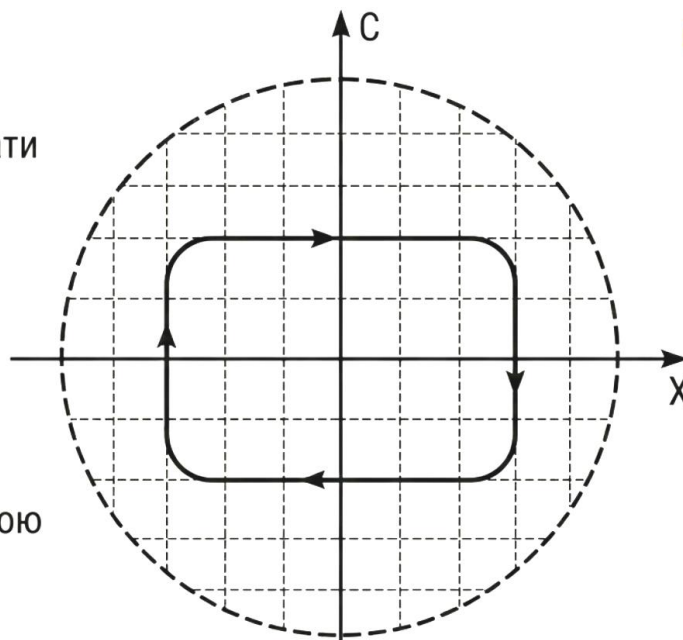


Рисунок 1.4 – Геометрія площини координат X-C при використанні функції G12.1

1.2.4. Еліптичне точіння

Метод для обробки нерегулярних радіальних форм шляхом динамічної синхронізації осі C патрона з осями XYZ . Це дозволяє обробляти складні внутрішні та зовнішні еліптичні контури на верстатах з віссю Y .

1.3. Особливості лінійної, кругової та гвинтової інтерполяції

Різниця між лінійною, круговою та гвинтовою інтерполяцією полягає в траєкторії руху інструменту, кількості задіяних осей та якості кінцевої обробки.

1. Лінійна інтерполяція (Linear Interpolation).

- Траєкторія: Рух інструменту відбувається по прямій лінії між двома заданими точками.
- Осі: Зазвичай задіює рух по одній або двох осях одночасно (наприклад, X та Z).
- Особливості: Хоча цей метод є найпоширенішим, він може створювати дискретність (розриви) у русі інструменту, що призводить до підвищених вібрацій та зносу.
- Якість: У багатьох випадках лінійна інтерполяція демонструє незадовільну якість поверхні саме через вібрації під час роботи.

2. Кругова інтерполяція (Circular Interpolation)

- Траєкторія: Інструмент рухається по дузі або колу.
- Осі: Задіює скоординований рух у площині двох осей (найчастіше X та Y або X та C для токарних центрів).
- Переваги: Забезпечує плавнішу траєкторію, що покращує якість поверхні та зменшує механічне напруження порівняно з лінійною інтерполяцією.
- Точність: Цей метод демонструє вищу стабільність процесу, більшу геометричну точність та менші відхилення форми.

3. Гвинтова (гелікоїдальна) інтерполяція (Helical Interpolation)

- Траєкторія: Інструмент рухається за спіральною (гвинтовою) траєкторією.
- Осі: Це просунута форма кругової інтерполяції, яка вимагає одночасного керування за трьома осями: круговий рух у площині X-Y поєднується з лінійним переміщенням по осі Z.
- Застосування: Використовується для створення або розширення отворів, фрезерування кишень та нарізання різьблення.
- Переваги методу:
 - краще відведення стружки завдяки простору між інструментом і стінкою отвору;
 - дозволяє одним інструментом створювати отвори різних діаметрів.
 - забезпечує значно більш плавний процес обробки, ніж лінійне врізання, оскільки розподіляє зусилля різання на три осі.

Загальні характеристики методів інтерполяції зведені у таблицю 1.1.

Таблиця 1.1.

Загальна характеристика методів інтерполяції

Характеристика	Лінійна	Кругова	Гвинтова
Форма руху	Пряма лінія	Дуга / Коло	Спіраль (3D)
Кількість осей	1 або 2	2 (X, Y або X, C)	3 (X, Y + Z)
Стабільність	Нижча (можливі вібрації)	Висока	Найвища для глибоких отворів
G-коди	G01	G02 / G03	G02/G03 + координата Z

1.4. Порівняння гвинтової інтерполяції з традиційним свердлінням отворів

Гвинтова (гелікоїдальна) інтерполяція – це метод створення або розширення отворів за допомогою спіральної траєкторії інструменту, що є сучасною альтернативою традиційному свердлінню.

Основна відмінність полягає в тому, що замість прямолінійного занурення інструмента в матеріал, фреза рухається одночасно за трьома осями (X , Y та Z), описуючи спіраль.

Порівняння цих двох методів за ключовими параметрами:

1. Гнучкість та інструментарій

- Гвинтова інтерполяція: Один інструмент (фреза) може створювати отвори різних діаметрів, що дозволяє значно зменшити інвентар інструментів на виробництві.
- Традиційне свердління: Зазвичай вимагає наявності свердла конкретного розміру для кожного окремого діаметра отвору.

2. Сили різання та навантаження на верстат

- Гвинтова інтерполяція: Використовує інструмент меншого діаметра, ніж сам отвір, і виконує легкі радіальні проходи. Це створює менше навантаження на шпиндель і раму верстата, що дозволяє робити великі отвори навіть на малопотужних верстатах.
- Традиційне свердління: Створення отворів великого діаметра вимагає значної потужності верстата та його високої жорсткості.

3. Відведення стружки

- Гвинтова інтерполяція: Забезпечує відмінне видалення стружки, оскільки між інструментом і стінкою отвору залишається вільний простір. Це запобігає повторному перерізанню стружки та поламці інструменту, що критично важливо при роботі з в'язкими матеріалами.
- Традиційне свердління: Може мати проблеми з евакуацією стружки, особливо в глибоких отворах, що підвищує ризик виходу інструменту з ладу.

4. Якість поверхні та точність

- Гвинтова інтерполяція: Процес фрезерування часто забезпечує кращу якість обробки стінок отвору порівняно зі свердлом. Розподіл сил на три осі також

сприяє довшому терміну служби інструменту та кращій точності фінішної поверхні.

- Традиційне свердління: Стінки отвору після свердла зазвичай мають вищу шорсткість, ніж після фрезерування.

5. Продуктивність та обмеження

- Швидкість: Для невеликих отворів стандартного розміру традиційне свердління залишається швидшим та ефективнішим методом. Гвинтова інтерполяція має довший цикл обробки в таких випадках.
- Вимоги до обладнання: Інтерполяція вимагає сучасного верстата з ЧПК, здатного до одночасного керування трьома осями, та складнішого програмування (коди G02/G03 із координатою Z).

Гвинтова інтерполяція є більш універсальним, надійним та точним методом для великих отворів або складних матеріалів, тоді як традиційне свердління переважає за швидкістю при масовому виготовленні малих отворів стандартних розмірів.

1.5. Загальна концепція інтерполяційного точіння

Власне інтерполяційне точіння на сучасних обробних центрах реалізується шляхом синхронізації кругового руху осей X та Y з обертанням шпинделя навколо осі заготовки [2]. Це дозволяє виконувати токарні операції (обробка зовнішніх та внутрішніх поверхонь, канавок, торців) на деталях, які залишаються нерухомими. Метод не прагне конкурувати з традиційним точінням за швидкістю зняття металу, проте він є незамінним для обробки симетричних елементів на великих несиметричних компонентах, де встановлення в патрон токарного верстата є неможливим.

Концепція інтерполяційного точіння базується на інноваційному підході, при якому 3-осьовий фрезерний обробний центр імітує роботу токарного верстата. У традиційній токарній обробці заготовка обертається навколо своєї осі симетрії, а різальний інструмент переміщується лінійно. Натомість при

інтерполяційному точінні заготовка залишається нерухомою, а токарний інструмент (наприклад, борштанга), закріплений у шпинделі, здійснює складний синхронізований рух.

Кінематика методу. Процес реалізується шляхом поєднання кругової інтерполяції за лінійними осями X та Y з одночасним обертанням шпинделя верстата. Шпиндель повинен бути точно синхронізований з рухом осей X - Y так, щоб різальна кромка інструмента завжди була орієнтована під правильним кутом до поверхні обробки. Фактично, інструмент описує спіральну або кругову траєкторію, де один повний оберт шпинделя відповідає 360 градусам переміщення за лінійними координатами. Додавання переміщення за віссю Z дозволяє створювати циліндричні отвори (ID), обробляти зовнішні діаметри (OD) або виконувати торцеве точіння.

Технічна ідентичність. Головною умовою реалізації концепції є здатність системи ЧПК забезпечувати інтерпольований рух між шпинделем та лінійними осями. На відміну від звичайного фрезерування, де шпиндель просто обертається з постійною швидкістю, тут він працює як повноцінна поворотна вісь, що досягає заданої кутової позиції одночасно з лінійними осями. Це дозволяє підтримувати постійний "чип-лоад" (навантаження на кромку), що імітує подачу на оберт на токарному верстаті.

Сфера застосування та переваги. Дана концепція не прагне замінити традиційне точіння за показниками швидкості зняття металу, проте вона є незамінною альтернативою в наступних сценаріях:

- складні несиметричні деталі: обробка симетричних елементів (фланців, канавок під ущільнення, гнізд клапанів) на великогабаритних корпусах, які неможливо збалансувати або закріпити в патроні токарного верстата.

- концепція «Done-in-One»: можливість виконати повний цикл фрезерної та токарної обробки за одну установку, що критично важливо для забезпечення концентричності поверхонь та зменшення похибок перебазування.

- економічна гнучкість: використання стандартних модульних інструментів та фрезерних центрів замість спеціалізованих розточувальних верстатів із план-супортами (вісь W), що значно знижує інвестиційні витрати.

Обмеження та якість (рис. 1.5). Точність та концентричність при інтерполяційному точінні прямо пропорційні жорсткості верстата та швидкості обробки даних системою ЧПК. Оскільки метод покладається на динаміку лінійних приводів, він вимагає високої прецизійності осей X та Y для запобігання відхиленням форми. Незважаючи на меншу продуктивність порівняно з традиційним розточуванням, метод забезпечує чудову якість поверхні та високу надійність процесу завдяки вільному відведенню стружки, оскільки діаметр інструмента завжди менший за діаметр оброблюваного отвору.

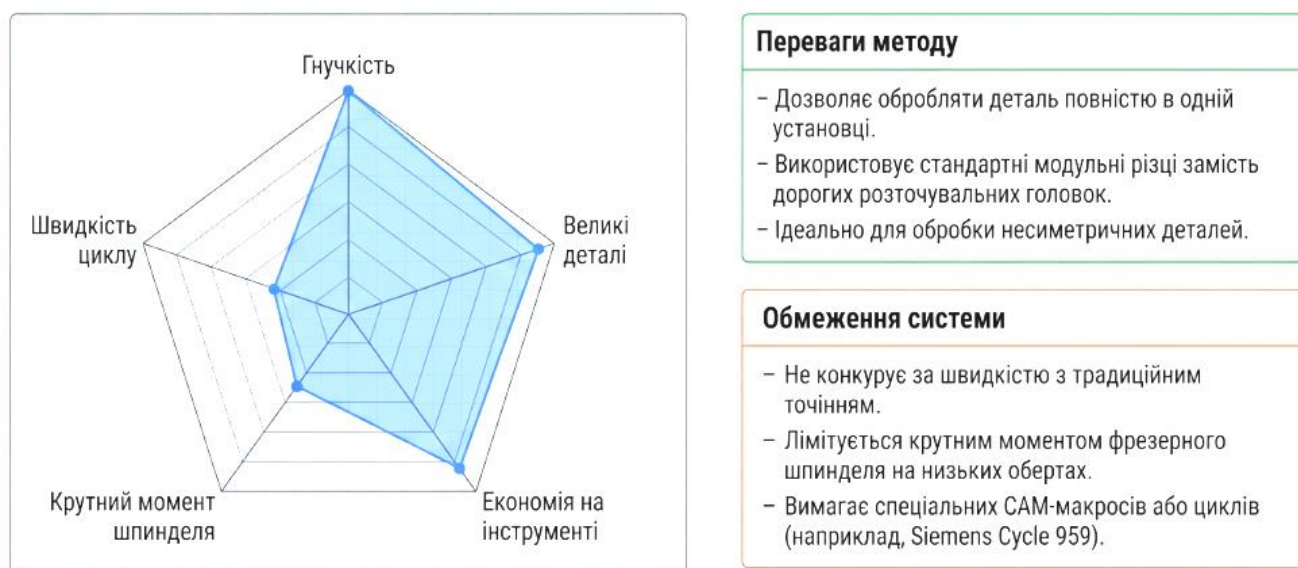


Рисунок 1.5 – Переваги та обмеження методу інтерполяційного точіння

РОЗДІЛ 2. РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ НА СУЧАСНИХ ОБРОБНИХ ЦЕНТРАХ

2.1. Вплив інтерполяції на якість поверхні та точність при обробці

Вибір типу інтерполяції та налаштування допусків безпосередньо впливають на точність, шорсткість поверхні та стабільність процесу обробки. Вплив типу інтерполяції – лінійна проти кругової (рис. 2.1). Кругова інтерполяція зазвичай забезпечує більш плавну траєкторію руху інструменту, що покращує якість поверхні та зменшує механічні напруги. Вона демонструє вищу стабільність процесу та менші відхилення форми порівняно з лінійною інтерполяцією.

	Традиційне точіння	Інтерполяційне точіння	Гвинтова інтерполяція	Полярна (G12.1)
Найкраще для	Стандартні симетричні вали	Зовнішні/внутрішні фланці на складних корпусах	Великі отвори, різьби	Торцеві лиски, шестигранники
Необхідний верстат	Токарний верстат	3+ осьовий фрезер із синхронізацією осі C	Стандартний 3-осьовий фрезер	Токарний з приводним інструментом
Профіль інструменту	Токарний різець	Розточувальна оправка або різець	Кінцева або різьбова фреза	Кінцева фреза (по центру)
Головне обмеження	Неможливо для несиметричних габаритів	Низькі оберти; потребує макросів	Повільніше за традиційне свердління для малих отворів	Складність офсетів; заборона швидких переміщень (G0)

Рисунок 2.1 – Параметри вибору виду обробки

Лінійна інтерполяція, хоча і є поширеною, може створювати розриви в русі інструменту, що призводить до підвищених вібрацій та зносу. Лінійна інтерполяція може давати незадовільну якість поверхні саме через ці вібрації.

При виконанні гвинтової (гелікоїдальної) інтерполяції розподіл зусиль різання між трьома осями (X, Y, Z) забезпечує кращу якість обробки стінок отвору, ніж при використанні звичайних свердл.

Вплив допусків. Менший допуск забезпечує вищу геометричну точність і кращу якість поверхні, але це суттєво збільшує час обробки через генерацію більшої кількості дрібних сегментів траєкторії.

Більший допуск дозволяє пришвидшити обробку, проте може призвести до компромісів у точності форми деталі. Застосування кругової інтерполяції з допуском 0,1 мм є ефективним варіантом для мінімізації відхилень форми та підвищення загальної точності процесу.

Точність та стабільність процесу. Для точності інтерполяційного точіння критично важливою є здатність верстата синхронізувати рух шпинделя з лінійними осями (синхронізація). Несинхронізований рух (коли осі не досягають заданої точки одночасно) робить виконання операції неможливим.

Похибки форми. Кругова інтерполяція забезпечує менші стандартні відхилення, що свідчить про більшу точність виготовлення порівняно з лінійним методом.

Величина подачі. Використання надмірної величини подачі в режимі полярної інтерполяції може негативно вплинути на точність оброблюваної форми, особливо поблизу центральної осі (точки $X0$, $C0$), де швидкість обертання може стати надмірною для приводів.

Якість поверхні та напрямок вимірювання. Якість поверхні (параметри шорсткості Ra , Rq , Rz) зазвичай є гіршою (параметри шорсткості вищі) у напрямку, перпендикулярному до слідів подачі інструменту. Це пояснюється тим, що саме в цьому напрямку сліди, залишені інструментом, є найбільш вираженими.

Незважаючи на переваги кругової інтерполяції для стабільності, в окремих випадках (наприклад, при обробці сталі VP50) лінійна інтерполяція може показувати дещо нижчі значення параметра Rz , хоча загалом тип інтерполяції може не мати статистично значущого впливу на середню шорсткість Ra .

Теоретичні переваги кругової інтерполяції знаходять пряме підтвердження при обробці сталі VP50. Встановлено наступне:

Стабільність. Кругова інтерполяція демонструє суттєво менші варіації стандартного відхилення форми, що підтверджує теорію про її вищу стабільність

порівняно з лінійним методом. Лінійна інтерполяція на практиці часто призводить до незадовільної якості поверхні через виникнення експлуатаційних вібрацій, що підтверджується також роботами.

Чутливість параметрів: Хоча середні значення шорсткості R_a можуть залишатися стабільними, параметр R_z (максимальна висота профілю) виявляється критично чутливим до типу інтерполяції. Згідно з даними експериментів, R_z гостро реагує на мікровібрації та адгезію стружки, які частіше виникають при лінійній сегментації траєкторії.

Оптимізація допусків. Було доведено, що кругова інтерполяція з допуском 0,1 мм забезпечує найкращий баланс між точністю форми та якістю обробки, підтверджуючи, що надмірне "затягування" допуску не завжди веде до статистично значущого покращення результату, але збільшує обчислювальне навантаження.

Вплив величини подачі. Практичні тести підтвердили теоретичну необхідність зниження подачі при роботі поблизу центру обертання (X-C zero), оскільки ігнорування цього правила призводить до помилок сервоприводів та геометричних відхилень.

Взагалі величина подачі має критичний вплив на точність обробки та виникнення похибок форми, особливо в режимах інтерполяційного точіння та полярної інтерполяції.

Основні аспекти впливу швидкості подачі на похибки форми включають:

- Зниження точності при надмірній подачі: Використання надто високої швидкості подачі може негативно вплинути на точність оброблюваної форми. Дослідження показують, що саме варіації подачі мають найбільший вплив на шорсткість та якість поверхні, де вищі швидкості подачі призводять до вищих значень шорсткості.
- Критичність біля центральної осі: При використанні полярної інтерполяції (режим G12.1) необхідно обов'язково знижувати швидкість подачі під час кругової інтерполяції поблизу нульової точки (X-C zero). Це пов'язано з тим, що кутова швидкість поворотної осі може стати надмірною, що

призводить до помилок сервоприводу або його перевантаження, що прямо веде до похибок форми.

- Вплив на сили різання: Збільшення швидкості подачі призводить до зростання сил різання, що своєю чергою може знизити якість виготовленої деталі та збільшити відхилення від заданої геометрії.
- Концентричність та стабільність: Для досягнення високої точності та концентричності (наприклад, при фінішній обробці отворів) рекомендується використовувати нижчу швидкість обробки, оскільки справжня точність отвору прямо пропорційна швидкості та жорсткості верстата.
- Чутливість параметрів шорсткості: Висока подача провокує виникнення ізольованих поверхневих аномалій, до яких особливо чутливий параметр R_z (максимальна висота профілю). Це може бути наслідком вібрацій, спричинених високим навантаженням при великій подачі.

Для забезпечення максимальної точності, особливо на складних траєкторіях, програмісти часто використовують уповільнену швидкість подачі на входах у контур та на фінішних проходах.

2.2. Роль системи ЧПК та необхідність синхронізації осей

Технічна реалізація інтерполяційного точіння вимагає від обладнання високого рівня обчислювальної потужності та здатності системи ЧПК координувати рух декількох осей у реальному часі.

Ключовою вимогою для виконання інтерполяційного точіння є здатність верстата синхронізувати рух шпинделя з лінійними осями [1, 2]. На відміну від стандартного фрезерування, де шпиндель працює в режимі швидкості (velocity mode) з постійними обертами, для інтерполяції він повинен працювати як повноцінна поворотна вісь (наприклад, SP1 або вісь C) [3, 4].

На рис. 2.2. графічно зображено взаємозв'язок між лінійними переміщеннями та кутовим положенням шпинделя: один повний цикл руху за осями X-Y відповідає рівно одному оберту шпинделя (360°), що є базовою умовою імітації токарної операції.

Синхронізація осей та шпинделя

Умова інтерполяції: Одночасне досягнення заданої цільової позиції всіма лінійними осями (X, Y, Z) та шпинделем.

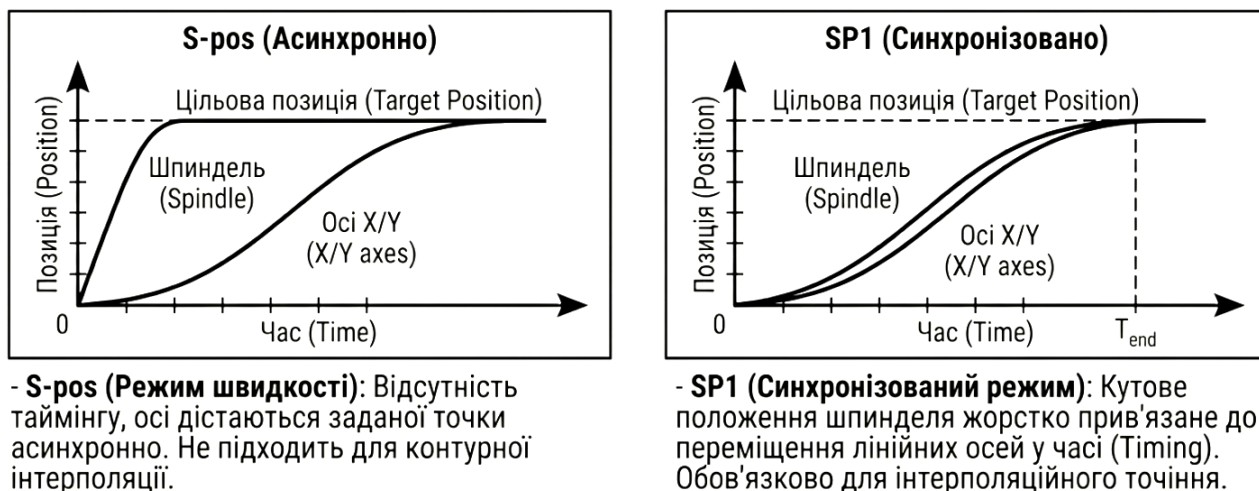


Рисунок 2.2 – Динаміка синхронізації осей при інтерполяційному точінні

Синхронізація означає, що всі задіяні осі (X, Y, Z та шпиндель) мають досягати заданої точки траєкторії одночасно. Якщо система не забезпечує належного таймінгу, траєкторія інструмента відхилятиметься від розрахункової, що призведе до спотворення геометричної форми деталі [5, 6].

2.3. Програмування в режимі полярної інтерполяції (G12.1)

Для полегшення програмування складних контурів на торцях деталей використовується функція G12.1 (рис. 2.3) (або G112) [4, 7]. Цей режим дозволяє оператору задавати координати в декартовій системі (X-C), де вісь C розглядається як лінійна вісь [8, 9]. Система ЧПК автоматично конвертує ці команди у полярні координати (кут повороту та радіус) [4, 10].

При роботі в режимі G12.1 існують певні обмеження:

- вибір площини: повинна бути активною площина G18 (X-Z), яка є стандартною для токарних операцій;
- нульова точка: центр системи координат (X0, C0) має бути жорстко зафіксований у центрі обертання шпинделя; його зміщення не допускається;

– швидкість подачі: слід уникати надмірних швидкостей поблизу центру обертання, оскільки кутова швидкість поворотної осі може стати критичною, спричиняючи помилки сервоприводу.

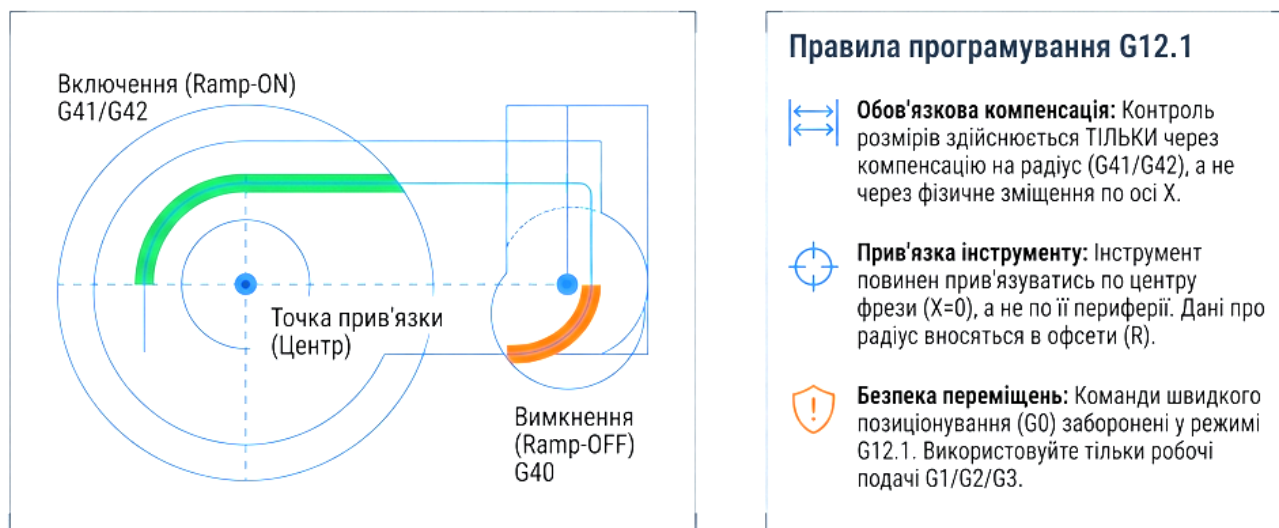


Рисунок 2.3 – G12.1: Виконання команди з компенсацією на радіус інструменту

2.4. Налаштування інструмента

Реалізація методу на фрезерному верстаті вимагає специфічного налаштування розточувальної оправки або іншого токарного інструмента (рис. 2.4):

– геометричні вимірювання: довжина інструмента встановлюється від торця шпинделя до вершини пластини [3]. Також необхідно визначити радіальний офсет – відстань від центральної осі шпинделя до різальної кромки;

– орієнтація (Clocking): інструмент повинен бути точно зорієнтований щодо осей верстата. Для цього шпиндель орієнтують (команда M19 або SPOS), а оправку виставляють так, щоб пластина була перпендикулярна до поверхні обробки [2, 3]. Будь-який кутовий відхил можна компенсувати через програмний офсет у системі координат шпинделя.

Розрахунок геометрії інструмента

Завдання: Визначення точної відстані від осі обертання шпинделя до ріжучої кромки інструмента для компенсації в ЧПУ.

- **Радіус інструмента (R):** Визначається як [Вимірний діаметр утвореного отвору] / 2.

- **Кутова орієнтація шпинделя (C-offset):** Налаштування нормалі різця до оброблюваної поверхні (наприклад, кутове зміщення 62.5° для позиціонування інструмента у стартову точку контуру).

- **Застосування:** Дозволяє використовувати стандартні розточувальні різці для профілювання замість спеціалізованих U-axis головок.

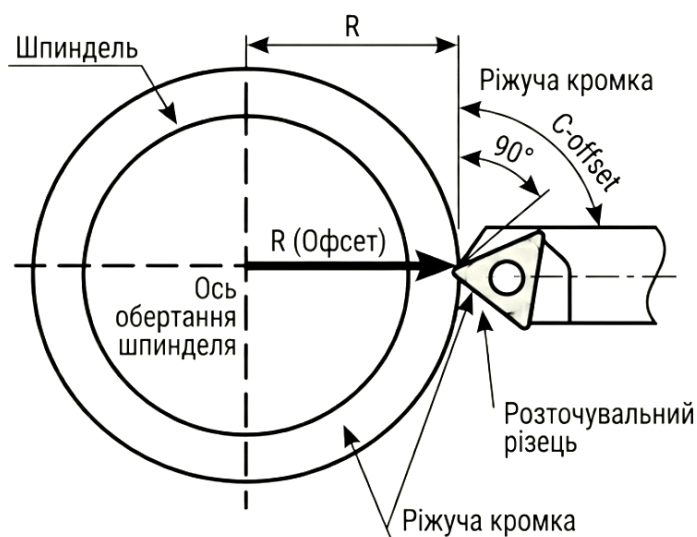


Рисунок 2.4 – Налаштування офсетів інструменту (відстань від центру шпинделю до кромки)

2.5. Розрахунок швидкості подачі (F1 та F2)

При круговій та гвинтовій інтерполяції виникає різниця між швидкістю подачі на різальній кромці (F1) та подачею центру інструмента (F2). Це пов'язано з тим, що кромка і центр рухаються по дугах різних радіусів [4].

Для внутрішнього діаметра (ID): Швидкість центру інструмента завжди менша за швидкість кромки. Наприклад, при обробці отвору діаметром 4" фрезою 3", подача центру може бути на 75% меншою за необхідну подачу на кромці.

Для зовнішнього діаметра (OD): Швидкість центру інструмента буде більшою за швидкість на кромці.

Нехтування цими розрахунками призводить до невідповідності фактичного навантаження на зуб розрахунковому, що погіршує шорсткість поверхні та знижує стійкість інструмента.

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ІНТЕРПОЛЯЦІЙНОГО ТОЧІННЯ ПРИ ОБРОБЦІ ДЕТАЛЕЙ

Ефективність інтерполяційного точіння значною мірою залежить від правильного вибору інструментального забезпечення, розрахунку режимів різання та налаштування параметрів у САМ-системах.

3.1. Рекомендації щодо вибору інструментального оснащення

Для успішної реалізації методу необхідно враховувати жорсткість інструментальної збірки та доступ до поверхні обробки. Рекомендується використовувати модульні системи (Coromant Capto) через їхню здатність передавати вищий крутний момент порівняно з HSK-A. Концентричність обробки прямо пропорційна жорсткості системи та вильоту інструменту. Для запобігання налипанню матеріалу (особливо на сталі VP50 або алюмінії 6061) необхідно використовувати МОР з високою змащувальною здатністю, наприклад, Motorex Swissscool.

Рекомендується використовувати:

- модульні рішення: поєднання адаптерів верстатного інтерфейсу (наприклад, Coromant Capto) з перехідниками для внутрішнього та зовнішнього точіння дозволяє створювати гнучкі інструментальні набори [1, 2].

- вибір радіуса інструмента: радіус інструмента (відстань від осі шпинделя до різальної кромки) слід тримати якомога ближче до радіуса деталі, що обробляється. Це обмежує амплітуду переміщень за осями X та Y, що підвищує стабільність процесу [3].

- демпфовані борштанги: При обробці глибоких отворів ($L/D > 4$) використання антивібраційних розточувальних штанг є обов'язковим для уникнення автоколивань [2];

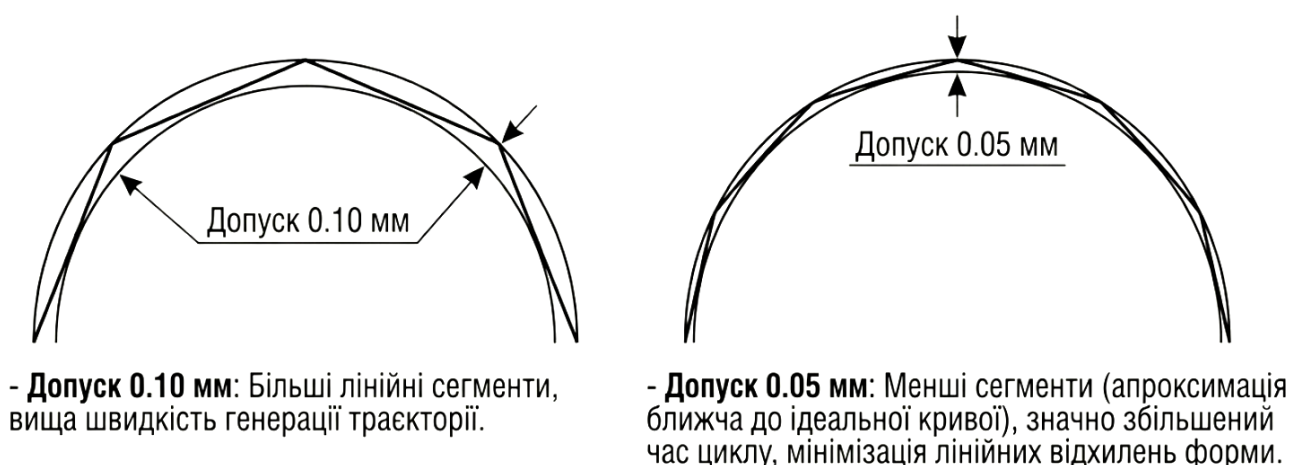
- вагові обмеження: необхідно стежити, щоб вага та момент інерції інструментальної збірки не перевищували можливостей автоматичного змішувача інструментів (АТС) верстата [1, 3].

3.2. Оптимізація параметрів САМ-програмування та допусків

Вибір методу інтерполяції та величини допуску в САМ-системі (наприклад, TopSolid або GibbsCAM) безпосередньо впливає на точність форми деталі [4, 5].

На рис. 3.1. наведено порівняння сегментації шляху при допусках 0,1 мм та 0,05 мм. Менший допуск генерує більшу кількість коротких сегментів для точного наближення до ідеальної кривої, що впливає на об'єм керуючої програми та якість поверхні.

Вплив допуску CAD/CAM на сегментацію траєкторії



Емпіричний висновок: Кругова інтерполяція з допуском 0.1 мм є найоптимальнішою для стабільності радіуса кривизни та мінімізації відхилень форми деталі.

Рисунок 3.1 – Вплив величини програмного допуску на апроксимацію траєкторії інструмента: порівняння сегментації траєкторії при допусках 0,10 мм та 0,005 мм

Тип інтерполяції. Для мінімізації відхилень форми та підвищення прецизійності процесу слід віддавати перевагу круговій інтерполяції. Дослідження показують, що вона забезпечує вищу стабільність порівняно з лінійною сегментацією траєкторії [6, 7].

Величина допуску. При обробці тривимірних порожнин оптимальним є використання допуску 0,1 мм. Зменшення допуску до 0,05 мм призводить до генерації значно більшої кількості дрібних сегментів програми, що суттєво

збільшує час обробки, проте не завжди дає статистично значуще покращення шорсткості поверхні [8].

Оптимізація допусків (за даними Costa et al., 2025, [1]). Дослідження на сталі VP50 (40 HRC) продемонструвало наступні результати (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1.

Вплив методу інтерполяції на результат обробки

Метод інтерполяції	Допуск (мм)	Результат
Лінійна	0.1	Найближче до номінального радіуса, але низька стабільність
Кругова	0.05	Висока точність, великий об'єм коду
Кругова	0.1	Оптимальний баланс стабільності та відхилень форми

Відповідно до даних табл. 3.1, хоча лінійна інтерполяція з допуском 0.1 мм математично була ближчою до специфікації радіуса, кругова інтерполяція забезпечує значно вищу повторюваність та менший розкид значень.

Якість поверхні: Слід враховувати, що параметр шорсткості Rz є найбільш чутливим до мікровібрацій та адгезії стружки, тому для фінішних проходів рекомендується використовувати кругову інтерполяцію з помірною швидкістю подачі [11, 12].

3.3. Методика розрахунку швидкості подачі для геометричної точності

При програмуванні контурної обробки (кругової або гвинтової) важливо розрізняти подачу на різальній кромці (F_1) та подачу центру інструмента (F_2), яка зазвичай і вказується в керуючій програмі верстата [2].

Обробка внутрішніх діаметрів (ID): Подача центру інструмента розраховується за формулою:

$$F_2 = F_1 \times \frac{D - d_1}{D}$$

де D – діаметр отвору, d_1 – діаметр інструмента.

У цьому випадку (рис. 3.2) подача центру завжди менша, як правило до 75% [11].

Обробка зовнішніх діаметрів (OD): Швидкість центру інструмента буде вищою за подачу на кромці:

$$F_2 = F_1 \times \frac{d_1 + D}{D}$$

де D – діаметр отвору, d_1 – діаметр інструмента.

У цьому випадку (рис. 3.2) подача центру завжди більша, як правило до 40% [11].

ЧПК розраховує подачу по центру інструмента $[F_2]$, але технологічний режим вимагає точної подачі на ріжучій кромці $[F_1]$.
Базова формула: $F_1 = \text{ipt} \times \text{nt} \times \text{rpm}$

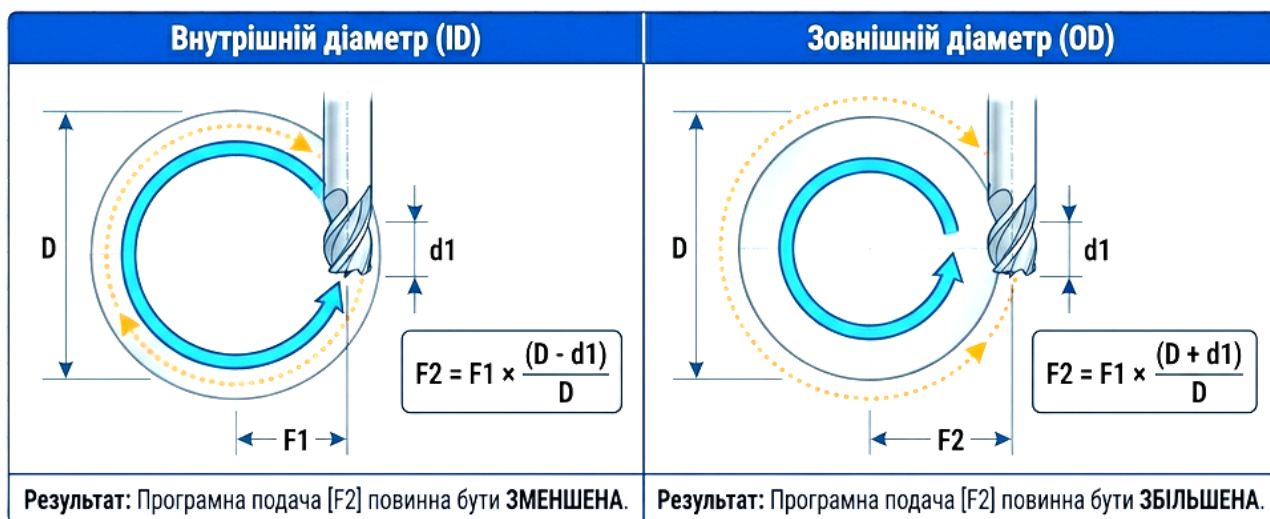


Рисунок 3.2 – Розрахунок подачі: компенсація центру інструменту.

Схема, приведена на рис. 3.3 ілюструє різницю в радіусах руху центру інструмента відносно різальної кромки, що є основою для розрахунку скоригованої швидкості подачі F_2 .

Кінематика подачі: Центр інструмента (F2) vs. Ріжуча кромка (F1)

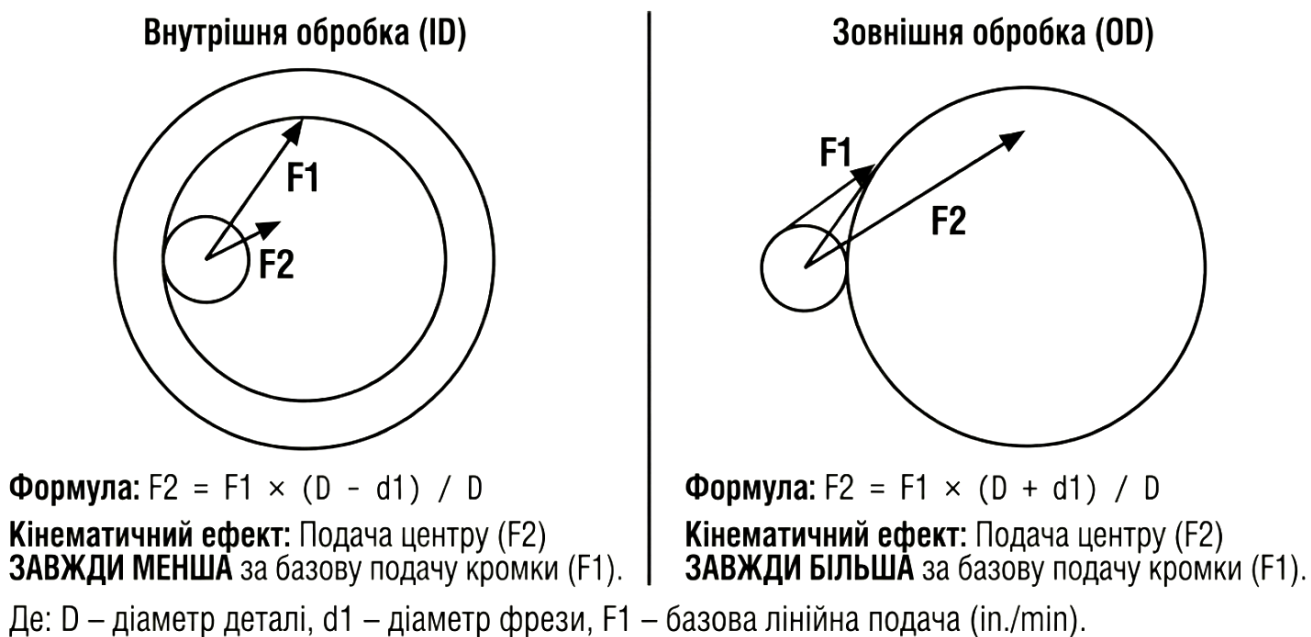


Рисунок 3.3 – Особливості траєкторій при обробці внутрішніх (ID)
та зовнішніх (OD) поверхонь.

Для забезпечення максимальної довговічності інструмента рекомендується застосовувати поступове вривання ("Ramp In") та вихід ("Ramp Out"), що дозволяє уникнути ударних навантажень та зарізів на поверхні [2].

3.4. Особливості обробки сталі VP50

Сталь VP50 з бейнітно-мартенситною структурою (твердість ~40 HRC) створює підвищені сили різання та схильна до інтенсивного тепловиділення [1].

Для стабільної обробки цього матеріалу найкращим варіантом визначено поєднання кругової інтерполяції з допуском 0,1 мм, що дозволяє мінімізувати відхилення лінійної форми.

При її обробці слід очікувати, що параметри шорсткості Rq та Rz будуть значно вищими за середнє арифметичне Ra через чутливість матеріалу до мікрівібрацій (рис. 3.4). Використання кругової інтерполяції дозволяє утримувати Ra в межах 1.60...1.98 мкм у перпендикулярному напрямку.

Особливості обробки сталі VP50

Мікроструктура: Бейнітно-мартенситна структура (твердість ~40 HRC).

Перевагою є зниження деформацій у порівнянні з відпущеними сталями.

Проблематика: Високі сили різання, інтенсивне тепловиділення, схильність до вібрацій, що прямо впливає на шорсткість поверхні.

Результати вимірювання шорсткості (сферична фреза GC-1010, покриття TiAlN):

Напрямок вимірювання	Ra (мкм)	Закономірність
Паралельно слідам	0.91 – 1.16	Стабільні та низькі показники
Перпендикулярно слідам	1.60 – 1.98	Значно вищі показники через перетин траєкторій

- **Параметр Rz:** Дуже чутливий до ізолюваних аномалій на поверхні (вібрації, мікросколи, налипання стружки), демонструє найвищу дисперсію.

Рисунок 3.4 – Особливості обробки сталі VP50

Через високу твердість матеріалу важливо забезпечити належне змащувально-охолоджувальне середовище (ЗОР) для відведення тепла та запобігання повторному перерізанню стружки, що може спричинити раптовий вихід інструмента з ладу [5].

3.5. Реалізація методів на сучасних обробних центрах

3.5.1. Роль систем ЧПК та програмна підтримка

Автоматизація розрахунків покладається на CAM-системи (GibbsCAM, TopSolid) або вбудовані цикли (Siemens Cycle 959). Критичне зауваження: використання інтерполяційного точіння вимагає специфічного налаштування файлів постпроцесора. Без прямої корекції постпроцесора система не зможе коректно згенерувати синхронізований код для осей та шпинделя.

3.5.2. Програмування та нюанси G-коду

- G12.1: Активація полярного режиму. Переміщення по Z мають бути винесені в окремі блоки від команд X-C.
- ACP / ACN (Siemens): Використовуються для повного контролю напрямку обертання шпинделя (Absolute Center Position / Negative). Без них

інструмент може почати обертання у зворотному напрямку при переході через нульову точку.

- Апроксимація дуг: При ручному програмуванні або налаштуванні САМ рекомендується розбивати повне коло (360°) на чотири 90-градусні дуги. Це запобігає некоректній інтерпретації радіуса контролером.

3.5.3. Синхронізація осей та шпинделя

Для інтерполяційного точіння необхідна жорстка часова прив'язка (timing). Використовується режим, де шпиндель розглядається як вісь (наприклад, SP1 у Siemens), що забезпечує одночасне досягнення заданої точки всіма осями. Використання команд типу `s_pos` у режимі швидкості є неприпустимим, оскільки вони не гарантують синхронізації з подачею.

3.5.4. Налаштування офсетів та "виставлення" інструменту

- Clocking (Орієнтація): Різальна кромка має бути суворо перпендикулярна до радіуса обробки. УВАГА: Не можна виставляти індикатор безпосередньо по пластині, оскільки вона має передній або задній кути нахилу (rake angles). Індикацію слід проводити по лисках оправки або ключах.
- Офсети: Кутовий офсет (наприклад, 62.5°) фіксується в параметрах робочої координати. Діаметральний офсет в X розраховується як відстань від центра шпинделя до кромки інструменту.

3.6. Приклади реалізації програм обробки різних методів інтерполяції

Приклади реалізації програм у G-кодах для різних методів інтерполяції, що використовуються на сучасних верстатах із ЧПК.

3.6.1. Полярна інтерполяція (G12.1 / G112)

Цей метод використовується для програмування обробки на торці деталі в декартових координатах, які система ЧПК автоматично перетворює на полярні (рух осі X та обертання осі C).

Приклад програми для фрезерування двох лисок (площини) на торці:

N100 (MILL TWO FLATS)

```

G40 G13.1          ; Скасування корекції та полярної інтерполяції
T0101              ; Вибір інструменту
M35                ; Активація осі C
G28 H0             ; Повернення осі C у нуль
G97 S1000 M33      ; Запуск приводного інструменту
G0 Z.1 C0          ; Підвід по Z та орієнтація осі C
X1.8               ; Підвід по X
G12.1              ; АКТИВАЦІЯ ПОЛЯРНОЇ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ
G1 G98 C0.4153 F20 ; Лінійне позиціонування в декартових координатах
X-C
G1 G41 X1.0 F5.     ; Включення корекції на радіус (G41)
Z - .375            ; Заглиблення по осі Z
C-0.4153            ; Фрезерування першої площини
G40 X1.8 F20        ; Відвід інструменту та вимкнення корекції
G13.1              ; ВИМКНЕННЯ ПОЛЯРНОЇ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ
M35                ; Вимкнення режиму осі C
M1                 ; Опційна зупинка

```

Примітка: У режимі G12.1 вісь C розглядається як лінійна вісь (у міліметрах або дюймах, а не в градусах)

3.6.2. Гвинтова (гелікоїдальна) інтерполяція (G02/G03 + Z)

Цей метод поєднує круговий рух у площині (X-Y) з одночасним лінійним переміщенням за віссю Z для створення отворів або різьблення.

Приклад коду для одного повного оберту (360°) зі зниженням по Z:

```

G03 X[end_x] Y[end_y] I[arc_center_x] J[arc_center_y]
Z[end_z] F[feed_rate]

```

- **G03:** кругова інтерполяція проти годинникової стрілки.
- **I, J:** координати центру дуги відносно початкової точки.
- **Z:** кінцева глибина для поточного витка спіралі.

3.6.3. Інтерполяційне точіння (Синхронізація шпинделя)

У цьому методі шпиндель верстата (як вісь SP1) синхронізується з лінійними осями X та Y для імітації токарної операції на фрезерному верстаті.

Приклад фрагмента програми для циклічного спірального заглиблення (Siemens Sinumerik):

; Розрахунок 180-градусної дуги з одночасним обертанням шпинделя
G2 X... Y... Z=IC(-0.0025) ACP(SP1=180) CR=...
; ACP(SP1=180) – шпиндель повертається на 180 градусів у позитивному напрямку
; Z=IC(-0.0025) – приріст глибини (половина кроку на оберт)
Важливо: Для реалізації цього методу шпиндель повинен працювати в режимі інтерпольованої осі, а не просто обертатися з постійною швидкістю.

3.6.4. Лінійна та кругова інтерполяція (G01, G02/G03)

Це базові методи руху інструмента:

- **G01:** Рух по прямій лінії між двома точками.
- **G02/G03:** Рух по дузі в площині X-Y без зміни глибини за віссю Z (на відміну від гвинтової).

При програмуванні кругової траєкторії для **внутрішнього діаметра (ID)** або **зовнішнього діаметра (OD)** необхідно коригувати швидкість подачі на центрі інструменту (F2), оскільки вона відрізняється від подачі на різальній кромці (F1).

ВИСНОВКИ

На основі проведеного вивчення методів інтерполяційного точіння та їхнього впровадження в процес обробки складних деталей на сучасних обробних центрах можна зробити наступні висновки:

1. Інтерполяційне точіння є ефективною альтернативою традиційним операціям розточування та точіння, особливо при роботі з великогабаритними, несиметричними деталями (корпуси клапанів, колектори, патрубки). Метод дозволяє обробляти симетричні елементи без обертання самої заготовки, що усуває необхідність у складних пристосуваннях для балансування та додаткових установках, забезпечуючи високу точність взаємного розташування поверхонь.

2. Вибір типу інтерполяції є критичним для забезпечення якості поверхні. Кругова інтерполяція демонструє значну перевагу над лінійною, оскільки забезпечує більш плавну траєкторію руху інструмента, зменшує механічні напруження та вібрації, що безпосередньо впливає на стабільність процесу. Лінійна інтерполяція, хоча й широко застосовується, часто призводить до незадовільної якості поверхні через дискретність рухів та схильність до резонансних явищ.

3. Встановлено, що для досягнення максимальної геометричної точності та мінімізації відхилень форми оптимальним є використання кругової інтерполяції з допуском 0,1 мм. Хоча жорсткіші допуски (0,05 мм) дозволяють точніше апроксимувати контур, вони суттєво збільшують час обробки та обсяг керуючої програми без пропорційного покращення шорсткості поверхні.

4. Методи гвинтової та кругової інтерполяції дозволяють суттєво скоротити номенклатуру інструментів, оскільки одна фреза може створювати отвори та контури різних діаметрів. Окрім того, використання інструмента, меншого за діаметр отвору, забезпечує відмінне відведення стружки, що підвищує надійність процесу та запобігає пошкодженню обробленої поверхні.

5. Успішна реалізація методу вимагає високої жорсткості верстата та здатності системи ЧПК до точної синхронізації руху шпинделя з лінійними осями X, Y та Z. Точність обробки прямо пропорційна швидкості та здатності приводів

підтримувати задану траєкторію, особливо в критичних зонах поблизу центру обертання.

6. Незважаючи на те, що інтерполяційне точіння може поступатися традиційному за швидкістю зняття металу, воно є економічно вигідним рішенням завдяки зниженню інвестицій у спеціалізовані розточувальні головки та зменшенню часу на переналагодження обладнання.

7. Метод має певні обмеження, пов'язані з доступним крутним моментом шпинделя на низьких обертах, складністю ручного програмування та збільшеним часом циклу для малих отворів стандартного розміру, де традиційне свердління залишається ефективнішим.

Впровадження інтерполяційного точіння та оптимізація допусків у САМ-системах є виправданим кроком для сучасних машинобудівних підприємств, що прагнуть підвищити якість продукції та гнучкість виробничих процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Enhancing machined surface quality through optimized CAD/CAM interpolations and tolerance adjustments / G. G. S. Costa, L. L. T. Vaughan, F. J. R. Cangue, J. A. G. Sousa. *Revista Matéria*. 2025. Vol. 30. Art. e20250090. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620250090>.
2. Interpolation turning. Sandvik Coromant : [офіційний сайт]. 2024. URL: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/machining-centers/interpolation-turning>.
3. Zweifel K. Polar Coordinate Interpolation Function G12.1: Layout of The X-C Coordinate System Plane. 2006. 10 p. URL: <https://www.scribd.com/document/7000000/G12-1-Polar-Coordinate-Interpolation-Guide>.
4. ID and OD Circular and Helical Interpolation : Technical Information. Widia Technical Data. URL: <https://www.widia.com/technical-data/interpolation-calculations>.
5. Unlock Precision with Helical Interpolation in CNC Milling. Shenzhen Xintianjian Industrial Co., Ltd : [блог]. 2025. URL: <https://xtj-cnc.com/blogs/news/helical-interpolation-in-cnc-milling>.
6. Coelho R. T., Watanuki H. M., Arai R. Furação com fresa de topo usando estratégia helicoidal em aço endurecido AISI H13. *Revista: O Mundo da Usinagem*. 2004. Vol. 1. P. 30–34.
7. Nunes J. M., Gomes J. O., Souza G. G., et al. Influência da interpolação da trajetória da ferramenta no fresamento a altas velocidades de superfícies complexas. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. 2008. Vol. 4, n. 4. P. 37–42. DOI: <http://doi.org/10.4322/tmm.00404007>.
8. Souza A. F., Ulbrich C. B. L. *Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC: Princípios e Aplicações*. São Paulo : Ed. Artliber, 2009.
9. Silveira J. F. *Fresamento toroidal do aço ABNT H13 endurecido, com ferramentas de cermet e de metal duro : Tese de M.Sc. Itajubá : Universidade Federal de Itajubá, 2002.*

- 10.Amin A. K. M. N., Abraham I., Khairusshima N. Influence of preheating on performance of circular carbide inserts in end milling of carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 185, no. 1–3. P. 97–105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.131>.
- 11.De Souza A. F. Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades de corte : D.Sc. Thesis. São Paulo : Universidade de São Paulo, 2004. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.18.2004.tde-14012005-101635>.
- 12.Shokrani A., Dhokia V., Newman S. T. Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2016. Vol. 21. P. 172–179. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.12.002>.
- 13.Lasemi A., Xue D., Gu P. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: a state of-art review. *Computer Aided Design*. 2010. Vol. 42, no. 7. P. 641–654. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cad.2010.04.002>.
- 14.Mesquita R. A., Jarreta D. D., Barbora C. A. Estudo comparativo entre os aços VP50 IM e DIN 1.2711. *Anais do 2º Encontro da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes*. São Paulo, Brasil, 2004.
- 15.Лисенко О. В. Розробка динамічної моделі технологічної оброблювальної системи точіння з урахуванням багатомасовості / О. В. Лисенко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - Кременчук : КДПУ, 2008. - Вип. 6. Ч. 1. - С. 74-76.
- 16.Лисенко О. В. Забезпечення високих різальних властивостей інструментального оснащення високошвидкісних обробних центрів / О. В. Лисенко // «Наука в ЦНТУ: основні досягнення та перспективи розвитку»: зб. тез доп. LVІ наук.-техн. конф. викладачів, аспірантів та співробітників за підсумками проведення «Дня науки – 2025» (24-25 квітня 2025 р.). – Кропивницький: ЦНТУ, 2025. – С. 75-76.
- 17.Марченко М., Лисенко О. Принципи та механізми реалізації інтерполяційного точіння на фрезерних верстатах з ЧПК // Збірник тез доповідей здобувачів вищої освіти LVІІ науково-технічної конференції,

«Наука в ЦНТУ: основні досягнення та перспективи розвитку» за підсумками проведення «Дня науки – 2026» 22-23 квітня 2026 року. Кропивницький: ЦНТУ, 2026. – С. 94-95

- 18.Пестунов, В. М., Лисенко О. В. Підвищення ефективності верстатних систем управлінням критичними параметрами процесу обробки // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград : КНТУ, 2005. - Вип. 16. - С. 56-62. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/16654>.
- 19.Купчевич Є., Скібінський О., Апаракін А., Лисенко О. Підвищення стійкості різального клину розточувального інструменту при обробці переривчастих отворів // Збірник праць молодих науковців ЦНТУ. - Кропивницький, 2024. - Вип. 14. Ч.1. - С. 44-49.