УДК 621.9.015:004.896

ПРИНЦИПИ ТА МЕХАНІЗМИ РЕАЛІЗАЦІЇ ІНТЕРПОЛЯЦІЙНОГО ТОЧІННЯ НА ФРЕЗЕРНИХ ВЕРСТАТАХ З ЧПК

М. Марченко, група ПМ-22-3
О. Лисенко, кандидат технічних наук, доцент
Центральноукраїнський національний технічний університет

Відомі способи розширення технологічних можливостей металорізальних верстатів [1], які потребують модернізації приводів, що є серйозним недоліком. Можливості обробних центрів дозволяють вирішити подібне завдання складним програмуванням робочих рухів виконавчих органів, прикладом якого є інтерполяційне точіння. Інтерполяційне точіння є сучасною технологією обробки на багатозадачних верстатах та обробних центрах, де токарна операція виконується шляхом кругової інтерполяції осей X та Y при одночасному синхронному обертанні шпинделя з контуром обертання [2]. На відміну від традиційного точіння, де обертається заготовка, тут вона залишається нерухомою, а різальний інструмент (наприклад, розточувальна оправка або фреза) описує складну траєкторію. Це дозволяє виконувати операції з обробки зовнішніх і внутрішніх діаметрів, торців та канавок на верстатах, які зазвичай призначені для фрезерування [2, 6].

Розвиток сучасного машинобудування вимагає обробки великогабаритних та несиметричних деталей (корпуси клапанів, колектори, складні патрубки), які важко або неможливо закріпити в патроні токарного верстата. Інтерполяційне точіння дозволяє обробляти такі компоненти за одну установку, що значно підвищує точність взаємного розташування поверхонь [2]. Окрім того, метод зменшує витрати на спеціалізоване обладнання та інструмент, замінюючи дорогі розточувальні головки з віссю W стандартними модульними рішеннями [2]. Однак ефективне впровадження цієї технології потребує глибокого розуміння впливу стратегій інтерполяції (лінійної, кругової, гвинтової) та програмних допусків CAD/CAM на фінішну якість поверхні [3].

Метою є аналіз впливу різних типів інтерполяції (лінійної та кругової) та величини допусків у системі автоматизованого програмування (CAM) на параметри шорсткості поверхні (Ra, Rz, Rq) та геометричну точність (відхилення форми, радіус кривизни). Особлива увага приділяється обробці важкооброблюваних матеріалів, наприклад таких як сталь VP50 [3], що схильна до вібрацій та підвищеного зносу інструменту.

Теоретична основа інтерполяційного точіння ґрунтується на здатності системи ЧПК забезпечувати синхронізований рух між шпинделем верстата та його лінійними осями. На відміну від стандартних операцій, де шпиндель обертається з постійною швидкістю, інтерполяція вимагає, щоб усі задіяні осі досягали заданої координати в один і той самий момент часу. Існують три основні теоретичні моделі методу інтерполяційного точіння:

Полярна інтерполяція (режим G12.1): Теоретично цей метод дозволяє програмувати обробку на торці деталі за допомогою декартових координат, які система автоматично перетворює на полярні (радіус та кут) [4, 5]. У цьому режимі поворотна вісь C розглядається як лінійна, що спрощує створення складних геометричних контурів, таких як еліпси або багатогранники. Практична реалізація цього методу вимагає суворого дотримання нульової точки (X0, C0), оскільки будь-яке зміщення призводить до фатальних похибок геометрії.

Гвинтова (гелікоїдальна) інтерполяція: це складний рух інструменту за спіральною траєкторією, що поєднує кругову інтерполяцію у площині X-Y з одночасним лінійним переміщенням за віссю Z [6]. Теоретично такий підхід дозволяє розподілити сили різання на три осі, що зменшує радіальне навантаження порівняно з лінійним врізанням. Важливою є різниця між швидкістю подачі на різальній кромці та швидкістю центру інструменту. При обробці внутрішніх діаметрів швидкість центру інструменту повинна бути суттєво нижчою за швидкість кромки, щоб підтримувати задане навантаження на зуб.

Апроксимація траєкторії. Теоретично будь-яка крива в системі CAD/CAM може бути описана або як послідовність коротких лінійних сегментів (лінійна інтерполяція G01), або як набір дуг (кругова інтерполяція G02/G03) [3, 6]. Величина допуску визначає, наскільки дрібно

буде сегментовано траєкторію: менший допуск генерує коротші сегменти для точнішої апроксимації ідеального контуру.

Згідно з результатами наведеними у роботі [3], 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 [7, 8].

Чутливість параметрів: Хоча середні значення шорсткості Ra можуть залишатися стабільними, параметр Rz (максимальна висота профілю) виявляється критично чутливим до типу інтерполяції. Згідно з даними експериментів, Rz гостро реагує на мікровібрації та адгезію стружки, які частіше виникають при лінійній сегментації траєкторії [3].

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 [3].

Вплив швидкості. 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 [4, 5].

Висновки. Реалізація методу вимагає не лише геометричного програмування траєкторії, а й глибокого налаштування параметрів синхронізації та допусків у CAM-системі, що прямо впливає на чистову шорсткість та геометричну відповідність деталі. Кругова інтерполяція є переважною для операцій інтерполяційного точіння, оскільки забезпечує вищу стабільність процесу та мінімальні відхилення геометричної форми порівняно з лінійною інтерполяцією. Вибір допуску в CAM-системі є інструментом балансування між якістю та продуктивністю: допуск 0,1 мм у поєднанні з круговою траєкторією продемонстрував найкращі результати точності для сталі VP50. Для забезпечення точності критично важливою є синхронізація шпинделя з осями X-Y; при наближенні до центру обертання швидкість подачі повинна бути зменшена, щоб уникнути помилок сервоприводу. Метод інтерполяційного точіння, хоча і поступається традиційному за швидкістю зняття металу, є економічно вигідним та технологічно гнучким рішенням для обробки складних деталей за одну установку.

Список літератури

1. Пестунов, В. М. Підвищення ефективності верстатних систем управлінням критичними параметрами процесу обробки / В. М. Пестунов, О. В. Лисенко // 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.
2. Interpolation turning. Sandvik Coromant : [офіційний сайт]. URL: https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/machine-tooling-solutions/tooling-considerations/interpolation-turning (дата звернення: 19.04.2026).
3. 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/10.1590/1517-7076-RMAT-2025-0090.
4. Siemens Sinumerik. SINUMERIK 840D sl / SINUMERIK ONE / SINUMERIK 828D. ISO Milling. Programming manual. Polar coordinates interpolation (G12.1, G13.1) Guide URL: https://support.industry.siemens.com/cs/mdm/109783242?c=129955576971 (дата звернення: 19.04.2026).
5. Zweifel K. G12.1 Polar Coordinate Interpolation Guide. 2006. 10 p. URL: https://www.scribd.com/document/425429149/G12-1-pdf (дата звернення: 19.04.2026).
6. 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.
7. 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.
8. 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