

### КОРЕКЦІЯ ТРАЄКТОРІЙ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗА АПОСТЕРІОРНОЮ ІНФОРМАЦІЄЮ

Розглядається методика підвищення точності оброблення фрезеруванням складних 3D поверхонь деталей в одиничному виробництві. При обробленні таких поверхонь процес різання є квазістаціонарним, що провокує виникнення похибки формоутворення в результаті пружних деформацій технологічної оброблюючої системи. Наведена методика корекції управляючої програми верстата з числовим програмним керуванням (ЧПК), що передбачає оброблення заготовки за два проходи. На першому проході оброблення виконується за теоретичною еквідистантою і після цього автоматично, за розробленою програмою, безпосередньо на верстаті вимірюється утворений профіль з метою отримання його цифрової моделі. Далі виконується комп'ютерне моделювання процесу фрезерування з метою визначення цифрових масивів складових сили різання. Після розрахунку цифрових масивів жорсткостей технологічної оброблюючої системи проводиться корекція траєкторії фрези на другому проході за схемою управління за апостеріорною інформацією з коефіцієнтом корекції, що дорівнює одиниці.

**Ключові слова:** фрезерування; точність формоутворення; корекція управляючої програми; моделювання; верстат з ЧПК.

**Вступ. Постановка проблеми.** При обробленні деталей різанням внаслідок дії сили різання на пружну технологічну систему завжди виникає похибка від її пружних деформацій. Тому виникла ідея корекції положення інструмента і заготовки в процесі оброблення. Така корекція, що знайшла назву автопідналагодження, для партії деталей за результатами вимірювань попередньо обробленої деталі описана в роботі [1]. Проте такий метод не може бути застосований при обробленні однієї деталі, яка до того ж має складну 3D форму. Завдання ускладнюється тим, що при обробленні складних поверхонь, навіть при еквідистантному припуску, процес різання є квазістаціонарним [2, 3].

Відомо, що головною метою будь-якого процесу оброблення різанням є забезпечення необхідної геометричної точності форми деталі. Оброблення виконується в пружній технологічній оброблюючій системі (ТОС) в умовах дії різних збурень, що поділяються на детерміновані і випадкові, тобто процес є стохастичним. Тому точність оброблення, що оцінюється похибкою, також буде підкорятися стохастичним законам. Для управління процесом оброблення різанням застосовують різні методи управління, які розрізняються за часом надходження інформації, що використовується для формування управляючого впливу [4]. У випадку невизначеності апріорних даних про процес різання та ТОС рекомендується застосовувати управління за апостеріорною інформацією. Алгоритм такого управління залежить від програми випуску деталей. Якщо метод застосовується у серійному чи масовому виробництві, то рекомендовано проводити корекцію траєкторії формоутворення на деталі, що оброблюється, за результатами вимірів попередньо обробленої деталі (рис. 1).

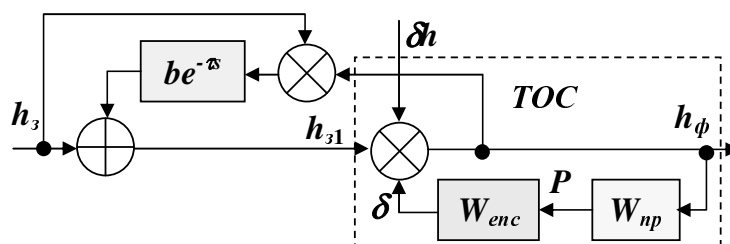


Рис. 1. Структурна схема управління за апостеріорною інформацією

Відповідно до структурної схеми управління процесом оброблення, що виконується у ТОС, яка є замкненою:

$$h_{\phi} = h_{31} - \delta - \delta h \quad (1)$$

де  $h_{\phi}$  – фактична глибина різання;  $h_{31}$  – задана в операції глибина різання;  $\delta$  – пружна деформація еквівалентної пружної системи з передатною функцією  $W_{enc}$ , що знаходиться під дією відповідної складової  $P$  сили різання, що виникла в результаті процесу різання з передатною функцією  $W_{np}$ ;  $\delta h$  – випадкова складова припуску.

Сутність управління полягає у тому, що виміряна координата, яка утворилася на деталі в результаті зрізування припуску  $h_{\phi}$ , порівнюється з заданою  $h_3$  на кресленні і результати через передатну функцію запізнення:

$$h_{31} = (h_3 - h_{\phi}) b e^{-s\tau} + h_3, \quad (2)$$

де  $b$  – коефіцієнт;  $\tau$  – час виконання операції;  $s$  – оператор Лапласа, що використовуються для формування заданої глибини  $h_{31}$  різання при обробленні наступної деталі.

Проте існують унікальні деталі, наприклад корпуси насосів атомних станцій, коли використання такого алгоритму управління є недоцільним. Тому застосовують інший підхід, що також використовує апостеріорне управління, але на одній деталі: припуск на оброблення розбивається мінімум на два проходи, а корекція на останньому проході виконують за результатами вимірів форми заготовки, що утворилася на попередньому проході. При цьому для токарного оброблення рекомендується урахувати зміну передатних функцій  $W_{enc}$  і  $W_{np}$  у функції формоутворюючої координати [5]. Відомі також розробки з методик корекції траєкторії формоутворення при фрезеруванні складних 3D поверхонь [6]. Однак запропоновані алгоритми передбачають управління за наявністю чи відсутністю автоколиваний ТОС, корекції форми траєкторії на особливих ділянках, при обході «гострих» кутів, тобто у місцях, де положення дотичної до контуру, що обробляється, є невизначеним [6, 7].

Таким чином, розрахунок корекції траєкторії при обробленні фрезерування складних 3D поверхонь одиничних, унікальних деталей на всій траєкторії формоутворення є актуальною науково-технічною проблемою.

**Постановка завдання.** Головною метою роботи є забезпечення необхідної точності геометричної форми та розмірів деталі шляхом визначення алгоритму формування управляючої програми на верстаті з ЧПК для корекції формоутворюючої траєкторії на останньому проході.

**Викладення основного матеріалу.** Відповідно до принципу управління за апостеріорною інформацією, для досягнення мети має бути створена замкнена система автоматичного управління, яка автоматично корегує управляючу програму за результатами вимірів поверхні, що була оброблена на попередньому проході. Виміри необхідно виконувати безпосередньо на верстаті з ЧПК трикоординатним шупом при виконанні спеціальної програми. Така програма має бути підготовлена з управляючої програми, що представляє еквідистанту центра фрези до контуру деталі, шляхом перерахування траєкторії на еквідистанту кульки вимірювального шупа. Можна також використовувати існуючі програмні продукти, наприклад, PowerInspect фірми Delcam [8].

Оскільки похибка, що утворюється під час виконання першого проходку залежить від багатьох факторів, що визначаються силовими характеристиками процесу різання і пружної ТОС, які у більшості випадків не можуть бути детерміновані з бажаною точністю, то реалізацію принципу корекції за апостеріорною інформацією пропонується виконувати за наступною методикою. Після зрізування припуску на першому проході і вимірів проводиться моделювання процесу фрезерування з використанням розробленого на кафедрі технології машинобудування НТУУ «КПІ» програмного забезпечення [9], що має бути модернізоване додаванням процедур визначення цифрових масивів складових сили різання на кожному кроці моделювання.

Крім того, необхідно враховувати замкненість процесу різання, що відбувається в пружній оброблюючій технологічній системі. Кожен зуб фрези має зрізувати шар припуску, що відповідає заданому в управляючій програмі положенню фрези і заготовки в будь який момент процесу. Внаслідок виникнення сили різання і відповідної пружної деформації фактичний шар припуску, що зрізується, змінюється, сила різання відповідно змінюється і відповідно знову змінюється шар припуску, що зрізується. Такі ефекти відбуваються перманентно і відображаються в математичній моделі [4, 10]. Процес фрезерування є нерівномірним за своєю природою і перманентні коливання, що виникають, провокують зміну шару припуску, що буде зрізуватися наступним зубом фрези. Таке явище має бути враховано в моделі як «оброблення за слідом», подібно до математичної моделі торцевого фрезерування, що була розроблена в [11].

Далі алгоритм дій за запропонованою методикою доцільно пояснити на прикладі оброблення контуру деталі, що складається з двох прямих і дуги кола (рис. 2). На рисунку лініями 1 і 2 позначені траєкторії фактичного руху центра фрези і теоретична еквідистанта на першому проході відповідно. Умовно показана розбіжність між двома траєкторіями, що обов'язково виникне під дією сили різання в один бік, хоча, залежно від умов різання (геометрії фрези, товщини шару припуску тощо), розташування може змінюватись. Використовуючи цифрові масиви складових  $[\delta_x]$  і  $[\delta_y]$  похибки, що виникла на першому проході, розраховуються цифрові масиви  $[C_x]$  і  $[C_y]$  жорсткості за відповідними осями координат:

$$\begin{aligned} [C_x] &= [\delta_x] / [P_x]; \\ [C_y] &= [\delta_y] / [P_y], \end{aligned} \quad (3)$$

де  $[P_x]$  і  $[P_y]$  – цифрові масиви відповідних складових сили різання, що були визначені на етапі моделювання процесу фрезерування.

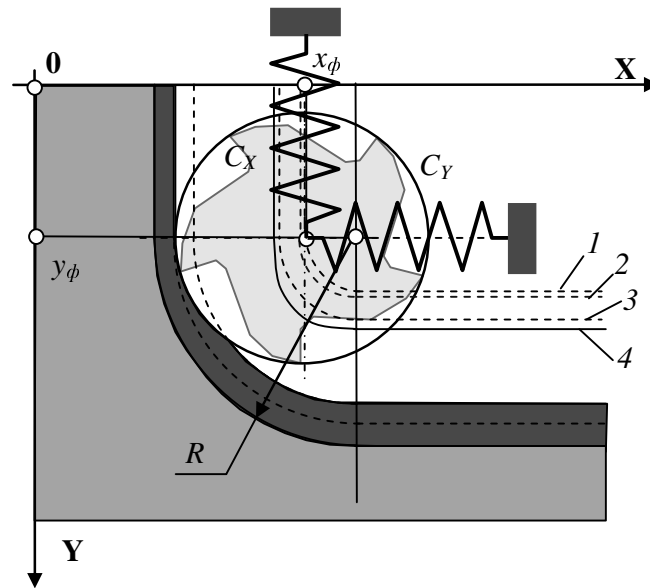


Рис. 2. Схема контурного фрезерування за два проходи

Проектування скорегованої траєкторії центра фрези відбувається знову при моделюванні процесу фрезерування контуру, але вже з урахуванням знайдених масивів жорсткостей за осями координат і замкненості пружної ТОС (рис. 1). При розрахунках коефіцієнт  $b$  корекції, враховуючи, що процедура відбувається під час оброблення однієї деталі з розбиттям припуску, необхідно приймати таким, що дорівнює одиниці. Після моделювання автоматично створюється масив похибок, що викликані пружними деформаціями, і за методом управління за апостеріорною інформацією формується масив координат скорегованої траєкторії, який зберігається у проміжному файлі, що через постпроцесор відповідного верстата з ЧПК перетворюється в управляючу програму у G-кодах. На рисунку 2 така скорегована траєкторія, яка призводить до усунення похибки від пружних деформацій ТОС, позначена лінією 4, а теоретична еквідистанта, що була первинно спроектована, – лінією 3.

**Висновки.** Запропонована методика проектування скорегованої траєкторії передбачає використання управління за апостеріорною інформацією, рекомендується для оброблення складних 3D форм деталей в одиничному виробництві, коли нестационарність процесу різання і недостатня жорсткість пружної ТОС призводять до значних похибок формоутворення.

#### Список використаної літератури:

1. Невельсон М.С. Автоматическое управление точностью обработки на металлорежущих станках / М.С. Невельсон. – М. : Машиностроение, 1982. – 184 с.
2. Петраков Ю.В. Моделирование процессов резания / Ю.В. Петраков, О.И. Драчев // ТНТ. – 2013. – 240 с.
3. Некрасов Р.Ю. Формообразование фасонных поверхностей при точении жаропрочных сталей и сплавов на станках с ЧПУ : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Р.Ю. Некрасов. – Тюмень, 2008. – 20 с.
4. Петраков Ю.В. Автоматическое управление процессами резания / Ю.В. Петраков, О.И. Драчев // ТНТ. – 2014. – 408 с.
5. Петраков Ю.В. Повышение точности токарной обработки на станках с ЧПУ / Ю.В. Петраков, Д.П. Ковальчук // Вісник НТУУ «КПІ» / Машинобудування. – № 68. – К., 2013. – С. 134–138.
6. Залогова В.А. Методика коррекции управляющих программ для обработки методом концевого фрезерования на станках с ЧПУ / В.А. Залогова, Д.В. Криворучко, Д.Г. Голдун. – Сумы, 2005 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zavantag.com/docs/298/index-1238809.html>.
7. Сосонкин В.Л. Программирование систем числового программного управления : учеб. пособие / В.Л. Сосонкин, Г.М. Мартинов. – М. : Логос, 2008. – 344 с.
8. Веретнов А. Контроль точности обработки изделий на станках с ЧПУ при помощи PowerINSPECT OMV / А.Веретнов // САПР и графика. – июнь, 2012. – С. 76–79.

9. *Петраков Ю.В.* Моделювання фрезерування кінцевими фрезами / *Ю.В. Петраков, О.С. Мацківський* // Вісник НТУУ «КПІ» / Машинобудування. – 2015. – № 73. – С. 78–83.
10. *Cheng K.* Machining dynamics: fundamentals, application and practices / *K.Cheng.* – Springer. – London, 2009. – 340 p.
11. *Петраков Ю.В.* Проектирование технологической оснастки / *Ю.В. Петраков* // LAP LAMBERT. – Saarbruckent, 2015. – 180 с.

ПЕТРАКОВ Юрій Володимирович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування НТУУ «КПІ».

Наукові інтереси:

- управління процесами різання на верстатах з ЧПК;
- процеси різання.

ЩУПЛЄЦОВ Данило Костянтинович – студент-магістрант кафедри технології машинобудування НТУУ «КПІ».

Наукові інтереси:

- управління процесами різання на верстатах з ЧПК.

Стаття надійшла до редакції 28.05.2015