

УДК 621.9.06-52

Ю.В. Петраков, д.т.н., проф.*Національний технічний університет України «КПІ»*

УРАХУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОРМОУТВОРЮЮЧИХ РУХІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ПРОГРАМИ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПУ

Розглядається нова методика проектування траєкторій холостих рухів робочих органів багатокоординатних верстатів з ЧПУ при обробленні складних 3-D поверхонь. Методика і створена прикладна програма забезпечує максимально плавний рух за критерієм мінімуму прискорення, що гарантує мінімальні динамічні навантаження на приводи формуютьорюючих рухів і технологічну обробляючу систему верстата.

Вступ. Намагання збільшити продуктивність верстатів з ЧПУ завжди пов'язано з підвищенням швидкостей формуютьорюючих рухів. Оброблення складних поверхонь проводять на верстатах з ЧПУ, що мають від трьох до п'яти керованих координат, приводи яких виконують складні рухи, які характеризуються змінами швидкостей і прискорень, що, в свою чергу, призводить до змін динамічних навантажень приводів та технологічної обробляючої системи. Найбільш сильно такі закономірності проявляються на шліфувальних верстатах з ЧПУ, оскільки, виходячи з технологічних особливостей процесу різання, необхідно забезпечувати досить високі подачі, що викликає відповідне збільшення швидкостей та прискорень формуютьорюючих рухів. Крім того, технологічні процеси виготовлення складних поверхонь деталей, що передбачають багатопрохідну обробку, потребують проектування траєкторій холостого руху, за якими відбувається перехід від одного робочого проходу до наступного. Тому виникає проблема: яка з траєкторій забезпечить найбільшу плавність зміни динамічних навантажень робочих органів верстата з ЧПУ? Вирішенню такої проблеми присвячується ця стаття.

Виклад основного матеріалу. Характерним процесом обробки складних поверхонь деталей з високими швидкостями формуютьорення є процес шліфування профілю калібру для пільгування труб (рис. 1, а). Профіль виконується на циліндричній поверхні і у будь-якому поперечному перетині має форму еліпса. Осі еліпсів змінюються за визначеним законом, котрий забезпечує необхідний оптимальний розподіл тисків при холодній прокатці труб.

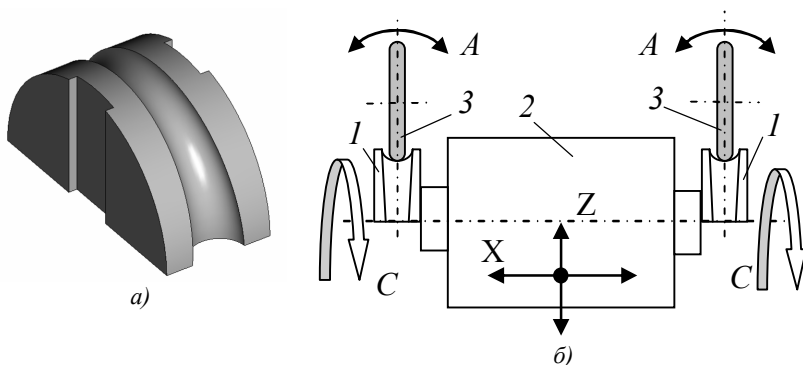


Рис. 1. Калібр для пільгерування труб (а)
та схема його формоутворення (б)

Схема формоутворення, що представлена на рис. 1, б, забезпечує одночасне оброблення двох деталей 1 і передбачає синхронний рух за координатами X і Z – переміщення бабки 2 виробу, за координатою A – поворот шліфувального круга 3 у функції кута повороту (координата C) шпинделя деталі. Поворот шліфувального круга необхідний для його встановлення за нормаллю до поверхні, що обробляється, в будь-якій точці профілю. Розповсюдження процесу формоутворення за всією оброблюваною поверхнею відбувається за рахунок багатопрохідної обробки при зсуві формоутворюючої траєкторії за еквідистантою до перетину профілю з задалегідь вибраним кроком зміни полярного кута α перетину профілю (рис. 2, а).

Розрахунок максимально допустимого кроку зміни полярного кута α проводиться з умови отримання потрібної шорсткості поверхні, яка оцінюється висотою Rz гребінця, що залишається при виконанні двох сусідніх проходів. Для зменшення кількості проходів при забезпеченні потрібної висоти гребінця оброблення необхідно проводити шліфувальним кругом з максимально допустимим радіусом R_o округлення, який визначається з умов формоутворення за мінімальним радіусом кривизни перетину профілю.

Розрахунок траєкторій формоутворюючих рухів виконується за алгоритмом, що визначає умови геометричного формоутворення складної поверхні калібру. Алгоритм передбачає визначення цифрових масивів, що представляють файл CLDATA за всіма координатами, що управляються. Наприклад, для розрахунку масиву даних за координатою Z розглядаються геометричні співвідношення схеми формоутво-

рення у перерізі, перпендикулярному осі обертання деталі (рис. 2, б). Таким чином, координата Z визначається з трикутника, що утворюється радіусом R_k шліфувального круга у місці різання, та радіусом R_m матеріального профілю поверхні калібру за траєкторією формоутворення у функції кута φ зміни координати C . В алгоритмі також передбачено урахування впливу координат одна на одну та їх зв'язок між собою.

Проте, оскільки профіль калібру розташований на циліндричній поверхні, яка займає кут $\leq 180^\circ$, то такі розрахунки забезпечують визначення траєкторії формоутворення саме на такому діапазоні зміни кута (лінія 1 на рис. 2, в). Для переходу на наступну траєкторію – лінія 3, що відповідає наступному проходу, необхідно визначити траєкторію холостого руху у зоні між кутами φ_0 і φ_2 .

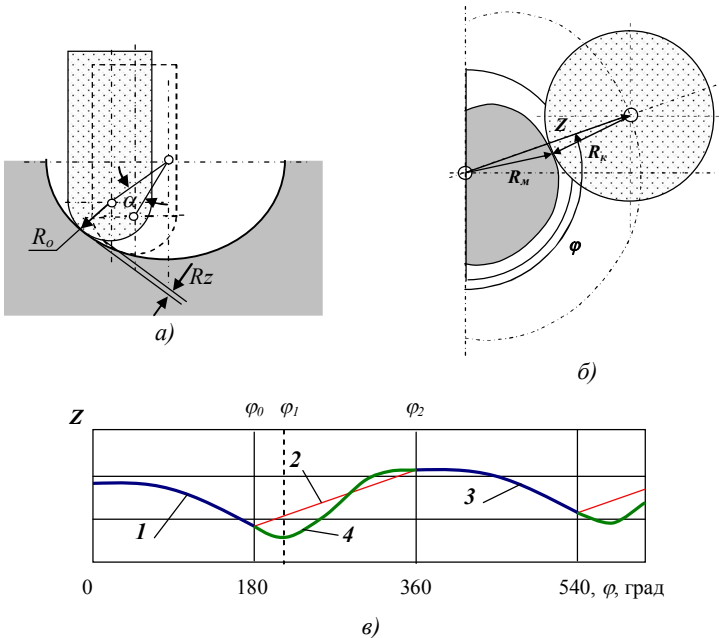


Рис. 2. Схеми формоутворення та траєкторії руху

Оскільки на такій ділянці траєкторії різання і відповідно формоутворення не відбувається, можна обирати будь-яку траєкторію руху. Проте необхідно забезпечити максимальну плавність руху, що оцінюється за мінімальним значенням другої похідної – прискорення. Отже,

оптимальною буде траєкторія, яка має найменше значення другої похідної і не має розривів похідних законів руху. Намагання забезпечити рух у зоні холостого ходу за лінійним законом, який забезпечує найкоротший шлях між двома позиціями (лінія 2 на рис. 2, в) не призводить до оптимального результату, оскільки такий закон в точках зшивання з формоутворюючим рухом має погані динамічні характеристики – розрив закону швидкості руху і стрибок прискорення теоретично до нескінченності.

Відомо, що найкращі динамічні характеристики мають такі закони руху: простий гармонічний, подвійний гармонічний або циклоїдальний та встановлені умови їх застосування [1]. Для їхнього вибору при застосуванні як траєкторій холостого руху необхідно проаналізувати параметри траєкторій формоутворюючих рухів на дільницях, що зшиваються, тобто в області до 180° та після 360° (див. рис. 2, в).

У відповідності до прийнятого початку координат на верстаті та напрямку формоутворюючих рухів на рис. 3 представлений фрагмент траєкторії за координатою Z та її параметри (перша $dz/d\varphi$ та друга $d^2z/d\varphi^2$ похідні) в кінці та на початку дільниць формоутворюючих рухів. При постійній швидкості зміни координати φ такі похідні прямо пропорційні швидкості та прискоренню руху за відповідною координатою.

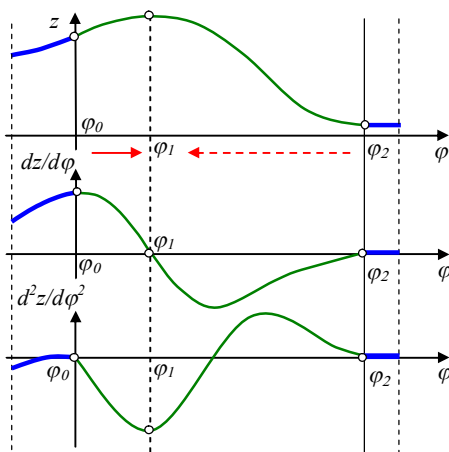


Рис. 3. Траєкторія холостого руху та її параметри

Проведений аналіз траєкторій показав, що найкращий за мінімумом другої похідної та максимальній плавності зміни буде рух за траєкторією, яка складається з двох законів: на дільниці кута від φ_0 до φ_1 –

за простим гармонічним законом, на дільниці кута від φ_1 до φ_2 – за подвійним гармонічним законом. При визначенні параметрів прийнятих законів необхідно враховувати такі початкові умови, щоб не тільки переміщення, а й похідні на кінцях дільниць, що зшиваються, співпадали. Крім того, необхідно розрахувати величину кута φ_1 , який визначає межу дії першого та другого законів руху.

У відповідності до обраної стратегії управління закон зміни аналога прискорення на першій дільниці має вигляд:

$$\frac{d^2 z}{d\varphi^2} = z_a \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_1}, \quad (1)$$

де z_a – амплітуда аналога прискорення.

Почерговим інтегруванням залежності (1) можна отримати закони зміни аналога швидкості і переміщення:

$$\frac{dz}{d\varphi} = -\frac{2\varphi_1 z_a}{\pi} \cos \frac{\pi\varphi}{2\varphi_1} + C_1, \quad z = -\frac{4\varphi_1^2 z_a}{\pi^2} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_1} + C_2, \quad (2)$$

де C_1 і C_2 – постійні інтегрування.

Постійні інтегрування визначаються, як завжди, початковими умовами, що мають гарантувати зшивання дільниць і необхідну плавність руху. Для визначення C_1 скористаємось наступними початковими умовами (див. рис. 3): при $\varphi = \varphi_1$ (в кінці першої дільниці) $(dz/d\varphi) = 0$. Звідки $C_1 = 0$. Для визначення C_2 з початкових умов при $\varphi = 0$ маємо $z = z_n$. Звідки $C_2 = z_n$.

Крім того, при $\varphi = 0$ (на початку першої дільниці) $(dz/d\varphi) = (z_v)_n$. Звідки з рівняння (2) для аналога швидкості руху можна визначити зв'язок між амплітудою A аналога прискорення і аналогом швидкості на початку першої дільниці:

$$z_a = -\frac{(z_v)_n \pi}{2\varphi_1}. \quad (3)$$

Таким чином закон руху на першій дільниці остаточно визначається за такою формулою:

$$z = \frac{2\varphi_1 (z_v)_n}{\pi} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_1} + z_n. \quad (4)$$

Рух на другій дільниці повинен відповідати подвійному гармонічному закону, який у загальному вигляді визначається так:

$$z = \frac{A}{\pi} \left[\left(1 - \cos \frac{\pi\varphi}{\delta\varphi} \right) - \frac{1}{4} \left[1 - \cos \frac{2\pi\varphi}{\delta\varphi} \right] \right], \quad (5)$$

де A – амплітуда руху; $\delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ – діапазон зміни аргументу. Причому для забезпечення зшивання двох законів руху напрям зміни аргументу на другій ділянці прийнятий протилежним першій (див. пунктирну лінію на рис. 3).

Для визначення амплітуди A руху і умов зшивання, які забезпечать плавність руху, необхідно вимагати рівності других похідних руху в кінці першої та на початку другої ділянок (див. рис. 3). Друга похідна з урахуванням (5) має вигляд:

$$\frac{d^2z}{d\varphi^2} = \frac{A\pi}{\delta\varphi^2} \cos \frac{\pi\varphi}{\delta\varphi} - \frac{A\pi}{\delta\varphi^2} \cos \frac{2\pi\varphi}{\delta\varphi}. \quad (6)$$

З умови при $\varphi = \delta\varphi$ маємо $(d^2z/d\varphi^2) = z_a$, можна отримати вираз для розрахунку амплітуди, що забезпечить плавність руху, тобто відсутність розриву закону зміни аналога прискорення:

$$z_a = \frac{A\pi}{\delta\varphi^2} \cos \pi - \frac{A\pi}{\delta\varphi^2} \cos 2\pi = -\frac{2A\pi}{\delta\varphi^2}. \quad (7)$$

З рівняння (7) після підстановки виразу (3) можна отримати:

$$A = \frac{(z_v)_n \delta\varphi^2}{4\varphi_1}. \quad (8)$$

Таким чином, за формулою (5) з урахуванням (8) та для забезпечення виконання початкової умови при $\varphi = 0$ маємо $z = z_k$, остаточно можна отримати закон руху на другій ділянці:

$$z = \frac{3(z_v)_n \delta\varphi^2}{8\pi\varphi_1} - \frac{(z_v)_n \delta\varphi^2}{4\pi\varphi_1} \cos \frac{\pi\varphi}{\delta\varphi} + \frac{(z_v)_n \delta\varphi^2}{8\pi\varphi_1} \cos \frac{2\pi\varphi}{\delta\varphi} + z_k. \quad (9)$$

У відповідності до запропонованого методу необхідно на першій ділянці холостого руху привести початкову швидкість до нуля, а на другій ділянці привести рух до значення положення z_k координати Z на початку руху за формоутворюючою траєкторією. При цьому забезпечується максимальна плавність руху за критерієм мінімуму аналога прискорення і за відсутності розривів як першої, так і другої похідних.

Проте, як видно з отриманих рівнянь рухів (4) і (9), для остаточно розв'язання задачі управління необхідно розрахувати кут φ_1 , що визначатиме діапазон дії першого та другого законів. З умов рівності переміщень в кінці першої та на початку другої ділянок, що відповідають таким значенням аргументу: $\varphi = \varphi_1$ для першої ділянки і $\delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ для другої ділянки, з рівнянь (4) і (9) можна отримати рівняння для визначення кута φ_1 :

$$3(z_v)_n \varphi_1^2 + 2[(z_n - z_k)\pi + (z_v)_n \varphi_2] \varphi_1 - (z_v)_n \varphi_2^2 = 0. \quad (10)$$

Рівняння (10) є квадратним відносно кута φ_1 , яке має розв'язок. Таким чином, в результаті виконання запропонованого алгоритму за умовами попереднього визначення початкового z_n і кінцевого z_k значень координати, що управляється, діапазону зміни координати φ_2 , а також величини $(z_v)_n$ швидкості зміни координати на початку дільниці холостого ходу, можна визначити комбінований закон управління, що складається з двох законів і забезпечує мінімально можливе прискорення та відсутність розривів першої та другої похідних.

Розроблений алгоритм був використаний у програмі моделювання процесу шліфування 3-D поверхні калібру ХПТ-32 для пільгування труб. В процесі моделювання автоматично створюється файл CLDATA, що містить дані за всіма чотирма координатами модернізованого верстата, який виконує формоутворення за схемою рис. 1, б.

Для перевірки файла була розроблена прикладна програма, інтерфейс якої представлений на рис. 4. У графічному вікні представлені траєкторії руху за координатою A – лінія 1, координатою Z – лінія 2 та координатою X – лінія 3.

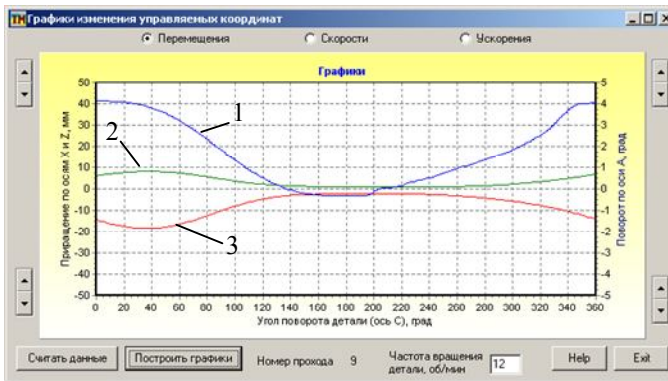


Рис. 4. Інтерфейс прикладної програми перевірки файла CLDATA

З графіків видно, що на дільниці холостого ходу (кут за координатою C змінюється від 0° до 196°) траєкторії за координатами Z і X відповідають спроектованим за розробленим алгоритмом. Рух за координатою A виконується за простим гармонічним законом (лінія 1 на рис. 4), оскільки швидкість руху на початку дільниці холостого ходу для цієї координати дорівнює нулю.

Висновок. Впровадження результатів роботи підтвердило високі динамічні властивості розроблених законів управління. Рух за всіма координатами виконується приводами верстата без непередбачуваного зменшення швидкості подачі, що свідчить про його плавність на дільниці холостого переміщення.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Петраков Ю.В.* Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням. – Київ: УкрНДІАТ, 2004. – 383 с.

ПЕТРАКОВ Юрій Володимирович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

- процеси обробки в машинобудуванні.

Подано 10.09.2007