

УДК 621.9.06

**Ю. М. ДАНИЛЬЧЕНКО**, д-р техн. наук,  
**А. В. КРИВОШЕЯ**, канд. техн. наук, **А. О. КАРСЬКА**, Київ, Україна,  
**М. Г. СТОРЧАК**, д-р техн. наук,  
**С. І. ПАСТЕРНАК**, Штутгарт, Німеччина

## **ПЕРВИННА ГЕНЕРАЦІЯ КООРДИНАТНИХ КОДІВ МЕТАЛОРИЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ**

Розроблено процедуру первинної генерації координатних кодів металорізальних верстатів на основі опису геометрії відтворюючих ліній оброблюваних поверхонь із використанням матриць перетворення координат.

Разработана процедура первичной генерации координатных кодов металлорежущих станков на основе описания геометрии образующих линий обрабатываемых поверхностей.

*Ju. M. DANIL'CHENKO, A. V. KRIVOSHEJA, A. O. KARS'KA,  
M. G. STORCHAK, S. I. PASTERNAK*

*PRIMARY GENERATION OF COORDINATE CODES OF METAL-CUTTING MACHINE TOOLS*

The procedure of the initial coordinate codes generation of the metal cutting machine tools on the base of the machined surfaces generating lines geometry description is developed.

Головними вихідними умовами при проектуванні металорізальних верстатів є метод формоутворення, відповідна йому схема рухів та спосіб реалізації цих рухів у верстаті, закладений у його компоновці. При проектуванні більшості універсальних та багатоцільових верстатів в основному аналізуються лише можливі варіанти схем виконавчих рухів і компоновок, придатних для реалізації заданого методу формоутворення, але при розв'язку принципово нових завдань обробки, дуже важливою може стати сукупність всіх трьох вищезазначених факторів [1]. Отже актуальним стає і завдання розробки загального теоретичного підходу до математичного опису послідовних процедур структурного синтезу – від методу формоутворення до його реалізації в компоновці верстата.

На даний час виконання процедур структурного аналізу і синтезу компоновок базується на відомій, попередньо заданій сукупності виконавчих рухів вузлів верстату [2, 3, 4, 5]. Математичною основою цих процедур є характеристика відносних рухів цих вузлів, задана у вигляді координатних кодів або відповідних їм матриць перетворення координат [4]. В свою чергу загальна кількість формоутворюючих рухів верстата однознач-

но визначається видом інструменту, формою його різальних кромок та методом формоутворення геометричних відтворюючих ліній оброблюваної поверхні [6]. Тому, застосувавши до опису геометрії відтворюючих ліній математичний апарат перетворення координат, цілком можливо подати її у вигляді сукупності відносних рухів, що мають реалізовуватись виконавчими вузлами верстату. Фактично це означатиме можливість первинної генерації координатних кодів верстатів за функціями формоутворення формоутворюючої системи (ФС) верстату [4], отриманими на основі опису геометрії відтворюючих ліній оброблюваних поверхонь [6].

Метою цієї роботи є розробка процедури первинної генерації координатних кодів металорізальних верстатів лише на основі аналізу геометрії відтворюючих ліній оброблюваних поверхонь.

З точки зору забезпечення можливості того чи іншого виду обробки на верстаті, задачі аналізу і синтезу їх компоновок базуються на описі формоутворення заданих поверхонь із використанням заданого інструменту. В цьому випадку траєкторія відносного руху різучих точок інструмента в системі координат оброблюваної деталі пов'язується із переміщенням ланок ФС верстата і визначається із використанням лише матриць руху (матриць перетворення координат для суміжних ланок ФС верстата) [4]. Математична модель ФС верстата, або функція формоутворення  $\mathbf{r}_0$ , записується у вигляді:

$$\mathbf{r}_0 = A_{0,l} \cdot \mathbf{r}_l = A_{0,l} \cdot A_l \cdot \mathbf{e}^4 = \prod_{i=1}^l A_{i-1,i}^{k_i} q_i \cdot \prod_{j=l+1}^{l+p} A_{j-1,j}^{k_j} q_j \cdot \mathbf{e}^4, \quad (1)$$

де  $A_{0,l}$  – загальна матриця перетворення координат ФС верстата;  $\mathbf{r}_l$  – радіус-вектор формоутворюючих точок інструмента в системі координат інструмента (математична модель інструмента);  $A_l$  – матриця перетворення початкової точки інструмента;  $A_{i-1,i}^{k_i} q_i$  і  $A_{j-1,j}^{k_j} q_j$  – матриці перетворення координат для суміжних ланок ФС верстата і послідовних перетворень початкової точки інструмента;  $q_i$  і  $q_j$  – параметри руху  $i$ -ї ланки ФС верстата і  $j$ -го перетворення початкової точки інструмента;  $k_i$  і  $k_j$  – коди матриць перетворення координат,  $l$  і  $p$  – число рухомих ланок (вузлів) ФС верстата і перетворень початкової точки інструмента;  $\mathbf{e}^4 = 0,0,0,1^T$  – радіус-вектор початку системи координат інструмента.

Відповідно (1), функція формоутворення  $\mathbf{r}_0$  однозначно визначається координатним кодом  $k$ , що являє собою впорядкований перелік кодів  $k_i$  і  $k_j$  матриць перетворення

координат [4]. Зміна порядку цього переліку узгоджується властивостями матриць перетворення координат і є основою для синтезу нових компонок верстата [4]. Тобто синтез нових компонок верстата з однаковими формоутворюючими можливостями обмежується заданим складом його рухомих вузлів, та їх початковим взаєморозміщенням. З іншого боку форма запису (1) відповідає рівнянню поверхні у формоутворюючому вигляді, тобто рівнянню із  $l + p$  змінними, серед яких лише 2-і незалежні (криволінійні координати точок поверхні).

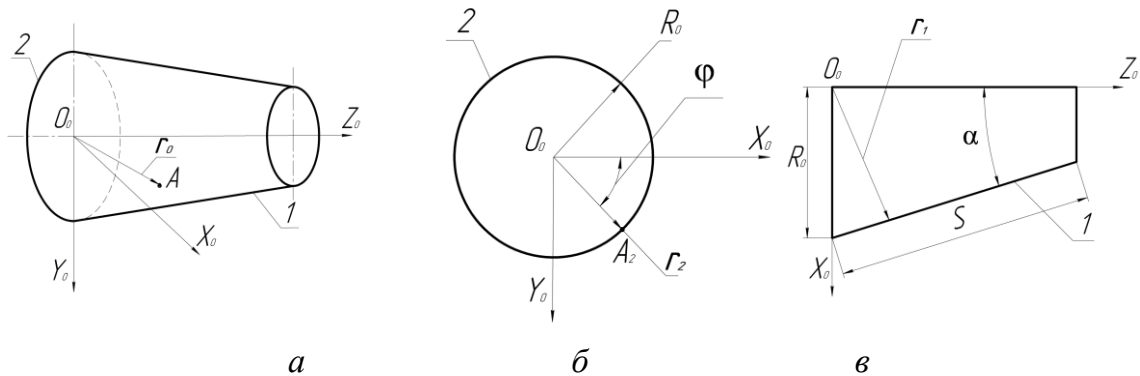


Рисунок 1 – Відтворюючі лінії конічної поверхні (а) та їх геометричні характеристики (б), (в): 1 – твірна відтворююча лінія; 2 – напрямна відтворююча лінія

Це дає підставу для розробки процедури синтезу, що базується на описі поверхні як результату відносного руху координатних (відтворюючих) ліній [6] з подальшим розмежуванням отриманих параметрів руху між верстатом та інструментом.

Розглянемо процедуру синтезу первинного координатного коду верстата на прикладі обробки деталі конічної форми.

Конічна поверхня утворюється шляхом руху твірної відтворюючої лінії 1 по напрямній відтворюючій лінії 2 (рис. 1), [6].

Запишемо рівняння цих ліній в системі координат поверхні із використанням матриць перетворення координат.

Напрямна лінія:  $\mathbf{r}_2 = A^6 \varphi \cdot A^1 R \cdot \mathbf{e}^4$ , або в розширеному вигляді

$$\mathbf{r}_2 = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cdot \cos \varphi \\ R \cdot \sin \varphi \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де  $R$  – радіус основи конуса (постійний параметр);  $\varphi$  - кутова координата (незалежна змінна,  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ).

Твірна лінія:  $\mathbf{r}_1 = A^1 R \cdot A^5 \alpha \cdot A^3 z \cdot \mathbf{e}^4$ , або в розширеному вигляді

$$\mathbf{r}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R - z \cdot \sin \alpha \\ 0 \\ z \cdot \cos \alpha \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де  $\alpha$  - половина кута конуса (постійний параметр);  $z$  - лінійна координата (незалежна змінна,  $0 \leq z \leq s$ ).

Виходячи із схеми формоутворення конуса (рис. 1), рівнянь відтворюючих ліній (2) і (3) та їх спільного параметра ( $R$ ), запишемо рівняння поверхні у вигляді функції формоутворення, як результату руху твірної лінії  $l$  по напрямній 2:

$$\mathbf{r}_0 = A_{0,1}^6 \varphi \cdot A_{1,2}^1 R \cdot A_{2,3}^5 \alpha \cdot A_{3,4}^3 z \cdot \mathbf{e}^4 = \begin{bmatrix} R - z \cdot \sin \alpha \cdot \cos \varphi \\ R - z \cdot \sin \alpha \cdot \sin \varphi \\ z \cdot \cos \alpha \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

В загальному вигляді рівняння (4) фактично визначає порядок і склад виконавчих рухів, необхідних для утворення конуса. При цьому змінні параметри рівняння (4) визначають склад формоутворюючих рухів, а постійних параметрів – установчих рухів у верстаті. Тоді, відповідно до форми запису рівняння (4), початковий координатний код верстату для обробки деталей конічної форми запишеться так:  $k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 = 6153$ .

Переходячи від запису рівняння конуса у вигляді функції формоутворення (4) до можливих варіантів його формоутворення на верстаті, скористаймося записом цього ж рівняння у формі (1):

$$\mathbf{r}_0 = A_{0,l} \cdot \mathbf{r}_l = A_{0,l} \cdot A_l \cdot \mathbf{e}^4 = A_{0,1}^6 \varphi \cdot A_{1,2}^1 R \cdot A_{2,3}^5 \alpha \cdot A_{3,4}^3 z \cdot \mathbf{e}^4. \quad (5)$$

Виходячи з рівняння (5), максимальна кількість виконавчих вузлів верстата, необхідних для формоутворення конуса дорівнює чотирьом. При цьому загальна матриця перетворення координат ФС верстата  $A_{0,l} = A_{0,1}^6 \varphi \cdot A_{1,2}^1 R \cdot A_{2,3}^5 \alpha \cdot A_{3,4}^3 z$ , матриця перетворення початкової точки інструмента  $A_l = \text{diag } 1,1,1,1$ , математична модель інструмента  $\mathbf{r}_l = \mathbf{e}^4$ , координатний код ФС верстата  $k = 6153$ . Ці умови відповідають схемі поздовжнього точіння точковим інструментом (табл. 1).

Таблиця 1

Поздовжнє точіння точковим інструментом	Фасонне точіння лезовим прямобічним інструментом	Фасонне точіння лезовим не прямобічним інструментом	Штампування

Якщо прийняти математичну модель інструмента у вигляді  $\mathbf{r}_i = A^3 z \cdot \mathbf{e}^4$ , то загальна матриця перетворення координат ФС верстата стане  $A_{0,l} = A_{0,1}^6 \varphi \cdot A_{1,2}^1 R \cdot A_{2,3}^5 \alpha$  і координатний код ФС верстата –  $k = 615$ . Ці умови відповідають схемі фасонного точіння лезовим прямобічним інструментом (табл. 1).

Здійснюючи аналогічні процедури по ускладненню форми інструменту, отримаємо й ряд інших умов, які відповідають відомим схемам обробки (табл. 1), а саме:

– для схеми фасонного точіння лезовим не прямобічним інструментом

$$\mathbf{r}_i = A^5 \alpha \cdot A^3 z \cdot \mathbf{e}^4, A_{0,l} = A_{0,1}^6 \varphi \cdot A_{1,2}^1 R, k = 61;$$

– для схеми штампування

$$\mathbf{r}_i = A^6 \varphi \cdot A^1 R \cdot A^5 \alpha \cdot A^3 z \cdot \mathbf{e}^4, A_{0,l} = \text{diag } 1,1,1,1.$$

Для останнього випадку необхідно зауважити, що фактично форма поверхні вже закладена в інструменті (метод копіювання), тому з точки зору теоретичного формоутворення цієї поверхні, не потрібно здійснювати формоутворюючих рухів, а треба виконати лише установчий рух врізання [6], а саме рух поздовж осі  $Z$ . Тому для схеми штампування загальна матриця перетворення координат буде –  $A_{0,l} = A_{0,1}^3(z)$ , і координатний код ФС верстата –  $k = 3$ .