

УДК 621.822:681.2:369.64

¹Заблоцький В.Ю., ²Дахнюк О.П.¹Луцький національний технічний університет²ДП Луцький ремонтний завод «Мотор»**КІНЕМАТИЧНИЙ СИНТЕЗ ФОРМОУТВОРЮЮЧИХ РУХІВ РІЗУЧОГО ІНСТРУМЕНТУ В РОБОЧОМУ ПРОСТОРІ БАГАТОШПИНДЕЛЬНОГО ТОКАРНОГО АВТОМАТА**

У статті проведено аналіз формоутворюючої системи багатошпindelного токарного автомата. Встановлено взаємозв'язки систем верстата як формоутворюючої машини. На основі матричної інтерпретації теореми Шаля здійснено математичне описання просторових рухів верстата.

Ключові слова: вібрація, поверхня, похибка, система контролю, токарний верстат.

В статье проведен анализ формообразующей системы многошпиндельного токарного автомата. Установлены взаимосвязи систем станка как формообразующей машины. На основе матричной интерпретации теоремы Шаля осуществлено математическое описание пространственных движений станка.

Ключевые слова: вибрация, поверхность, погрешность, система контроля, токарный станок.

The article analyzes the forming of multi-spindle automatic lathe. Established relationship systems of the machine as a molding machine. On the basis of the interpretation of the matrix theorem Sala performed a mathematical description of the spatial movements of the machine.

Keywords: vibration, surface, error, system control, lathe.

Відомо [1], що на точність виготовлення деталей машин та якість оброблюваних поверхонь в значній мірі впливає технологічне обладнання в цілому та формоутворюючі системи верстату зокрема, які виділені у системи ВІД (верстат-інструмент-деталь). Особливо актуальним є питання моделювання та синтезу формоутворюючих рухів системи ВІД багатошпindelних верстатів, оскільки вони в значній мірі впливають на формування показників якості та точності виготовлених деталей.

Система розрахунків точності верстатів дозволяє побудувати баланс точності верстата, з'ясувати вплив окремих чинників на точність обробленої поверхні, визначити похибку схеми формоутворення, діагностувати джерело похибки за наслідками вимірювання оброблених на верстаті деталей тощо.

Система розрахунків базується на перегляді традиційної математичної моделі основної кількісної характеристики точності - похибки механічного пристрою. Остання у відповідності з її фізичним сенсом може бути уявлена як повна варіація функції, що описує основне службове призначення пристрою, у зв'язку з чим пропонується метод розрахунку названий варіаційним. Для металоріжучого верстата такою функцією є функція формоутворення.

Систему розрахунків, що безпосередньо зв'язує відоме збурення процесу обробки з набором похибок оброблюваної деталі, називають моделлю точності верстата [2]. Запропонована модель (рис. 1) характерна тим, що в ній на основі використання принципу малої величини похибок отримані аналітичні вирази, що явно зв'язують вхідні і вихідні параметри. В якості вхідних параметрів моделі розглядаються похибки положення вузлів і елементів верстата, викликані різними фізичними причинами, як вихідні - похибки розмірів, розташування і форми оброблених на верстаті поверхонь. Це дозволяє зв'язати між собою дві групи оцінок точності верстата: по пробних зразках і по набору точнісних характеристик елементів верстата.

Код формоутворення (блок 1), що представляє собою впорядкований перелік номерів узагальнених координат переміщення ланок формоутворювальної системи при русі щодо сусідньої ланки, природним чином концентрує в собі основну інформацію про структуру формоутворювальної системи. Далі на місце кожного елемента коду підставляється одна з шести матриць узагальнених переміщень. Перемножуючи ці матриці в порядку, заданому кодом формоутворення, а потім множаючи матрицю-добуток на радіус-вектор ріжучого інструменту, одержуємо векторне рівняння (модель) формоутворювальної системи (блок 3). Додаючи до нього систему зв'язків між параметрами, знайдемо сукупність всіх оброблюваних на верстаті поверхонь у векторно-параметричному вигляді (блок 5). Блоками 1, 3 і 5 моделі точності виходу вичерпується об'єм розрахунків по моделюванню номінального (незбуреного) функціонування формоутворювальної системи.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

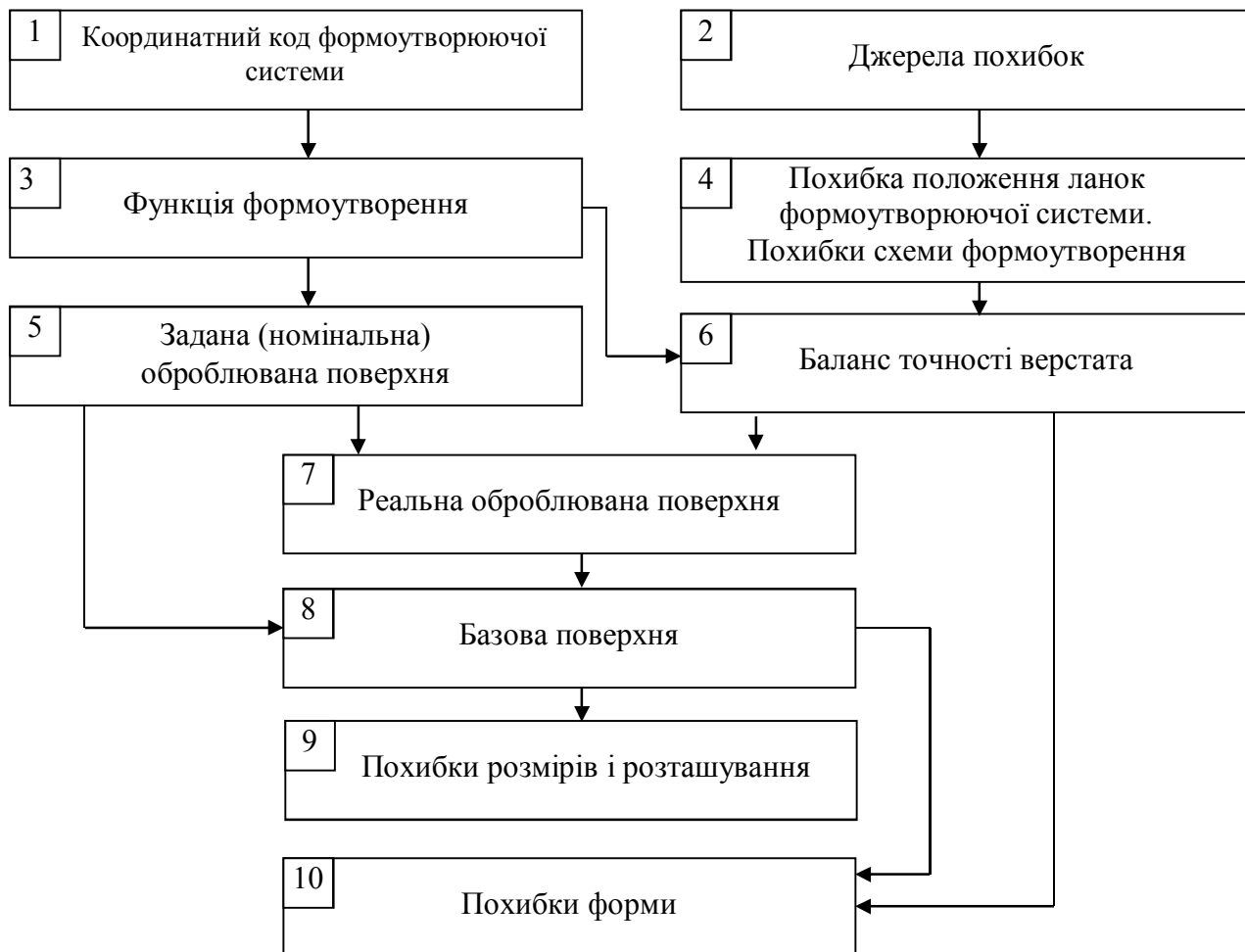


Рис. 1 Структурна модель точності верстата

Остання, крім заданих функціональних дій, випробовує також вплив збурень. Вони формуються під впливом різних фізичних джерел (блок 2) і викликають похибки положення вузлів і елементів верстата (блок 4).

Інформація про збурення і їх впливі на ланки системи з функцією формоутворення дозволяє побудувати баланси точності верстата (блок 6) - векторний баланс, задаючий вектор похибки положення кожної точки оброблюваної поверхні по відношенню до номіналу, і баланс нормальних похибок, що є проекцією вектора похибки на нормаль до поверхні.

Баланс точності служить основою для отримання метрологічних характеристик точності обробки. Для цього по точках обробленої поверхні будується базова поверхня (блок 8), призначення якої полягає в створенні розрахункової метрологічної бази для оцінки точності розміру, форми і положення (блоки 9 і 10).

Форма базової поверхні завжди відома вона співпадає з формою номінальної (заданій кресленням) поверхні.

Таким чином, модель точності виходу ґрунтується на розрахунку і подальшій апроксимації обробленої поверхні базовою поверхнею заданого вигляду. Відхилення параметрів базової поверхні від номіналу характеризують похибки розмірів і положення. Похибки форми потрактують або як варіація функції, що описує базову поверхню, або як функція від величин відхилень фактичної поверхні від базової.

Кожен з блоків (див. рис. 1) пов'язаний з певним математичним уявленням. Структура, що задається зв'язками між блоками, являється основою побудови як аналітичного розрахунку, так і розрахунку, що виконується на ЕОМ. Особливостями математичного апарату являються своєчасна лінеаризація аналітичних виразів на основі принципу малої величини похибок, а також симетрія основних розрахункових формул, що досягається за рахунок використання однорідних координат точок, векторного двохпараметричного завдання поверхонь, а також векторів і матриць четвертого порядку.

Формоутворювальною системою (ФС) верстата будемо називати сукупність механічних елементів системи ВІД, взаємне положення і переміщення яких забезпечує задану траєкторію руху ріжучого інструменту щодо оброблюваної деталі. В склад ФС входять станина і виконавські органи верстата разом з останніми ланками приводів. Кінцеві ланки ФС - оброблювана деталь і ріжучий

інструмент. В процесі наладки і роботи склад ФС може частково змінюватися за рахунок зміни окремих вузлів (наприклад, змінних коробок шпинделів), а також зміни типу оброблюваної деталі і інструменту. ФС виконує основну функцію верстата і явився найбільш важливою його частиною, визначальною службове призначення. Взаємозв'язок ФС з іншими системами верстата показаний на рис. 2. ФС сприймає рух від приводів і через різні датчики посилає сигнали зворотного зв'язку про положення окремих ланок в систему управління верстата. Ланка ФС - це сукупність вузлів верстата або інших елементів системи ВІД, зсуви яких один відносно одного в процесі функціонування верстата номінально відсутні.

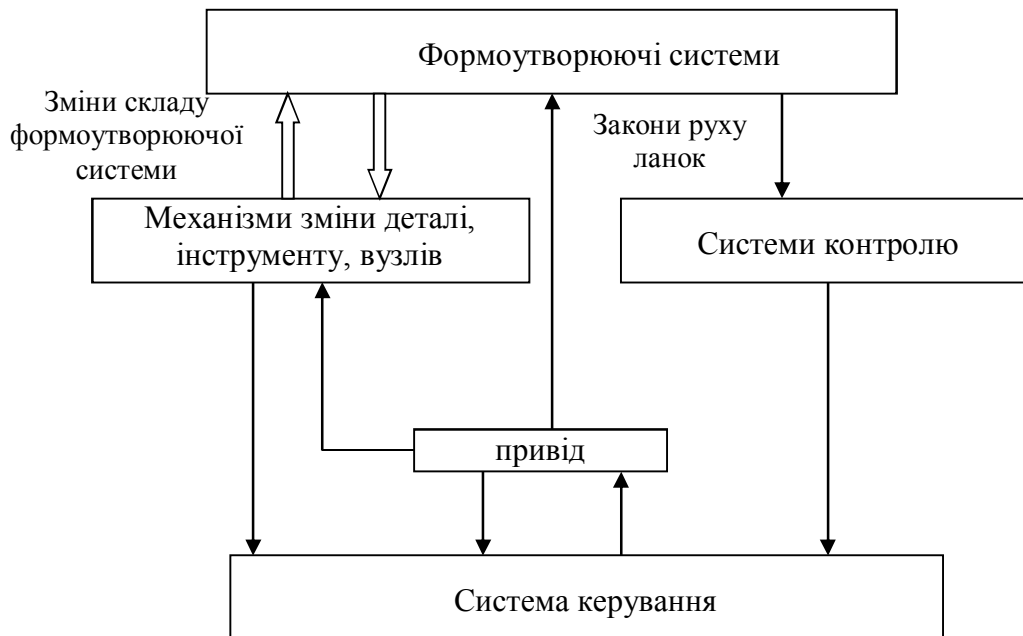


Рис. 2 Взаємозв'язки систем верстата як формоутворюючої машини

Таким чином, в 1-у ланку входять всі ті елементи, які під час роботи верстата залишаються відносно нерухомими. Наприклад, ланкою являється шпиндель токарного верстата разом з патроном і затисненою в ньому оброблюваною деталлю. ФС металоріжучих верстатів володіє наступною важливою особливістю: дві послідовні ланки мають у відносному русі не більше одного ступеня свободи. Це означає, що ланка може або повертатися відносно осі, фіксованої в сусідній ланці, або рухатися поступально вздовж фіксованої осі, або бути відносно нерухомою. Фізична причина такої особливості лежить в необхідності мати конструктивно незмінну систему опор для переміщення кожної ланки, що забезпечує точність, продуктивність і надійність верстата в цілому.

При аналізі геометрії і кінематики верстата всі ланки ланцюга ФС являються рівноправними, тобто достатнім є розгляд лише відносного руху ланок. При аналізі силових потоків у верстаті ця рівноправність порушується - з усіх ланок виділяють нерухому ланку - станину, розбиваючи, таким чином, ланцюг формоутворення на два напівланцюга: деталь - станина і станина - інструмент.

Коливання формоутворюючої системи верстата відбувається у двох системах координат S_{i-1} та S_i . Одна точка в цих системах буде мати різні координати за виключенням варіанту, коли обидві системи будуть абсолютно однаковими.

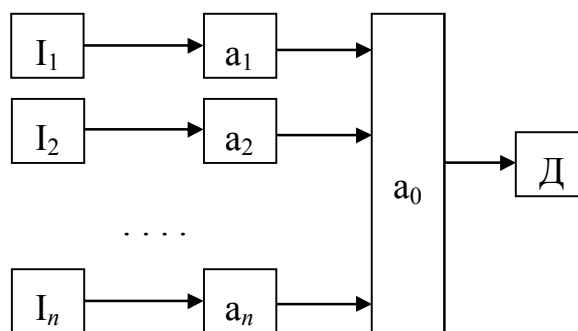


Рис. 3. Структура формоутворюючої багатоінструментальної системи
 $I_1, I_2 \dots I_n$ - ріжучі інструменти; Д - оброблювана деталь; $a_1 a_2 \dots a_n$ - елементи ФС, з'єднані з інструментом; a_0 — загальна частина ФС.

Опишемо радіус-вектори точки формоутворюючої системи типу:

$$r = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

У розглянутих системах координат позначимо їх як r_{i-1} r_i . Вони зв'язані матричним співвідношенням:

$$r_{i-1} = A_{i-1,i} r_i \quad (2)$$

де $A_{i-1,i}$ – матриця порядку 4х4 перетворення координат, яка має наступну структуру:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

лівий верхній блок матриці описує поворот системи S_i відносно свого початку координат O_i в таке положення, що осі систем S_i та S_{i-1} стають паралельними та одно напрямленими. Звідси витікає, що цей блок представляє собою ортогональну матрицю, тобто для всіх $i, k=1, 2, 3$

$$\sum_{j=1}^3 a_{ij} a_{kj} = \sum_{j=1}^3 a_{ji} a_{jk} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } i \neq k; \\ 1, & \text{якщо } i = k \end{cases} \quad (4)$$

крім того, визначник цієї матриці:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = 1 \quad (5)$$

Три перші координати a_{14} a_{24} a_{34} четвертого стовпця матриці представляють собою Декартові координати початку координат O_i системи S_i в системі S_{i-1} . Матриці класу A мають лише одну змінну q^j ($j=1, \dots, 6$), яка має зміст узагальненого переміщення твердого тіла (інструмента або заготовки) поступального переміщення або обертання. За допомогою цих матриць опишемо модель формоутворюючої частини верстата шляхом написання рівняння яке пов'язує координати точки у двох системах координат (моделі рухів ланок формоутворюючої системи). При створенні математичної моделі діє наступне правило знаків для аргументів q^j матриць. Аргумент q^j вважається додатнім, якщо система S_i рухається в додатному напрямку відносно осей системи S_{i-1} тобто:

1) лінійні зміщення $x=q^1$, $y=q^2$ або $z=q^3$ вважають додатними, якщо система S_i рухається в додатному напрямку відносно осей системи S_{i-1} ;

2) якщо кути повороту $\varphi=q^4$, $\psi=q^5$, $\theta=q^6$ вважають додатними, якщо система S_i обертається проти годинникової стрілки (якщо дивитися з додатного кінця осі обертання).

На основі матричної інтерпретації теореми Шаля [3] можна зробити висновок, що будь-яка матриця виду A може бути представлена у вигляді добутку не більше шести матриць A^j , які приведені в таблиці 1.

В якості базової схеми розглянемо ФС з одним ріжучим інструментом і однією оброблюваною деталлю. В цьому випадку ФС будується у вигляді ланцюга вузлів. Проміжні ланки ланцюга включають опори для двох сусідніх ланок, кінцеві ланки зв'язані опорами тільки з однією сусідньою ланкою.

Структура і ряд важливих властивостей ФС можуть бути в компактній і однозначній формі записані у вигляді деяких наборів цілих чисел. Ці набори далі будемо називати характеристичними кодами ФС. За допомогою цих кодів зручно фіксувати такі характеристики системи, як кількість і послідовність розташування ланок, їх відносний рух, швидкості цих рухів - як відносні, так і абсолютні. Основне значення має координатний код ФС, по якому однозначно відтворюється функція формоутворення верстата, що має для останнього таке ж значення, як функція положення, для механізму. Додаткова інформація про швидкості рухів, необхідна для побудови рівнянь оброблюваних поверхонь і аналізу компоновки, групується в швидкісний код верстата.

Форма запису властивостей верстата у вигляді набору цілочисельних кодів особливо зручна для побудови системи розрахунків на ЕОМ.

При розгляді номінальних (заданих) рухів вузлів верстата зручно представляти ФС як сукупність твердих тіл, кожне з яких може бути замінене при аналізі механічних параметрів системою координат S [3]. Початок O і осі X , Y , Z системи координат при цьому зв'язуються з конструктивними або технологічними базами вузла (8, 9). Такими базами переважно являються

направляючі, шпинделі, опори, точно оброблені площини і циліндричні поверхні.

Математичне описання просторових рухів верстата

Таблиця 1

Вид руху	Матриці, які модулюють рухи відносно осі		
	X	Y	Z
Поступовий вздовж осі	$A^1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$A^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$A^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
Обертання навколо осі	$A^4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$A^5 = \begin{pmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$A^6 = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

Тверде тіло, як відомо, може мати шість ступенів свободи. Оскільки ланки ФС володіють лише одним ступенем свободи у відносному русі, то з кожною ланкою однозначно зв'язується один з приведених нижче символів:

Рух ланки відносно попередньої: поступальний рух вздовж осі: X – 1, Y – 2, Z – 3. Обертальний навколо осі: X – 4, Y – 5, Z – 6.

Перенумеруємо всі ланки ланцюга формоутворення послідовно, починаючи з оброблюваної деталі і закінчуючи ріжучим інструментом. Номер i ланки отримає і його система координат S_i . При цьому оброблюваній деталі привласнимо нульовий індекс, тобто пов'яжемо з нею систему координат S_0 . Тоді відносний рух ланок ФС може бути представлений у вигляді числа k - впорядкованого переліку символів, який будемо називати координатним кодом системи (ланцюга):

$$k = k_1 k_2 \dots k_l \quad (6)$$

де k_i ($i = 1 \dots, l$) - позначення руху i -го ланки ФС відносно $(i-1)$ -ої; $k_i = 1 \dots, 6$; l - число рухомих вузлів системи.

Таким чином, координатний код k ФС представляє собою l -розрядне число, кожний розряд якого приймає значення n від 1 до 6. По фізичному сенсу це значення є номером узагальненої координати, відносно якої здійснює рух i -а ланка.

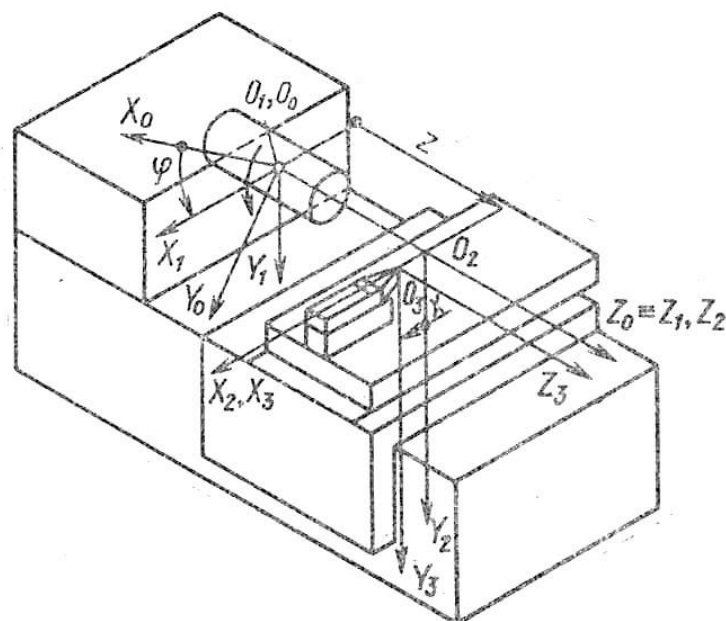


Рис. 4. Формоутворююча система токарного верстата

Складемо координатний код ланки ФС токарного верстата 16245Б. Нульовою ланкою ($i = 0$) являється оброблювана деталь з шпинделем. Наступна ланка ($i = 1$) — станина. Оскільки нульова ланка завжди вважається нерухомою, то у відносному русі станина обертається навколо осі Z_0 в напрямку, зворотному напрямку обертання шпинделя. Цьому руху відповідає символ 6, тобто $k_1 = 6$. Аналогічно, поступальний рух подовжнього супорта щодо станини здійснюється вздовж осі Z_1 , тобто $k_2 = 3$, і, нарешті, поперечний супорт поступально рухається вздовж осі X_2 , тобто $k_3 = 1$. Таким чином, для ланки токарного шестишпиндельного верстата координатний код ФС представляє собою тризначне число $k = 631$.

Інформація про швидкість відносних рухів ланок задається у вигляді швидкісного коду k_v , який представляє собою l -розрядне число (l — як і раніше число рухомих ланок ланцюга формоутворення), кожний розряд k_{vi} в якому приймає одне з трьох значень - 0, 1 або 2 залежно від швидкості i -го ланки, причому:

$k_{vi} = 0$, якщо i -а ланка ($i = 1 \dots, l$) нерухомо в процесі формоутворення щодо $(i - 1)$ -ої ланки;

$k_{vi} = 1$, якщо i -а ланка рухається із швидкістю подачі;

$k_{vi} = 2$, якщо i -а ланка здійснює головний рух.

Початкова ланка ланцюга формоутворення, яким явилася оброблювана деталь, завжди вважається у відносному русі нерухомим. Перелік узагальнених координат в коді k і швидкостей в коді k_v починається, таким чином, з ланки, наступної за оброблюваною деталлю.

Швидкісний код ланки токарного верстата має вигляд:

$k_v = 211$, де $k_{vi} = 2$ означає, що перша ланка (станина) у відносному русі скоює головний рух: $k_{v2} = k_{v3} = 1$ означає, що друга і третя ланки (подовжній і поперечний супорти) здійснюють (можуть здійснювати) рухи подачі.

Зафіксувавши положення нерухомої в абсолютному русі ланки (станини верстата), отримаємо код K компоновання верстата. Якщо станиною явилася i -а ланка, то в координатний код k праворуч від k_i вписується нуль. В результаті код компоновання має вигляд:

$$K = k_1 k_2 \dots k_i 0 k_{i+1} \dots k_l \quad (7)$$

де $k_1, k_2 \dots, k_l$ - позначення з формули (6).

Легко бачити, що можливий $n+1$ варіант розміщення станини у ФС.

Модель формоутворюючої системи. Розглянемо ФС, що складається з ланок, які послідовно спираються одна на одну, серед яких l рухомих і одна нерухомо. Пов'яжемо з i -ю ланкою систему координат S_i і пронумеруємо системи, починаючи від оброблюваної деталі, якій привласнимо значення $i=0$, до ріжучого інструменту, для якого $i = l$

Для будь-якої групи послідовних ланок ФС маємо:

$$r_{N-1} = A_{N-1}^{i_{N+1}}, N A_{N, N+1}^{j_{N+1}} \dots A_{M-1, MrM}^{j_M}, N \triangleleft M, \quad (8)$$

Введемо позначення для твору матриць A^j

$$\prod_{k=N}^M A_{k-1, k}^{j_k} = A_{N-1, M} \quad (9)$$

Тоді формула (8) прийме вигляд:

$$r_{N-1} = A_{N-1, MrM} \quad (10)$$

Формула (10) дозволяє обчислити вектор r_{N-1} якщо відомий вектор r_M . Якщо ж заданий r_{N-1} , то

$$r_M = (A_{N-1, M})^{-1} r_{N-1} \quad (11)$$

де $(A_{N-1, M})^{-1}$ - зворотна матриця, обчислення якої спрощується, якщо скористатися властивістю 4 матриць A_j .

Якщо в рівнянні (10) покласти $N=1$ і $M = l$, то отримаємо зв'язок між координатами точок ріжучого інструменту в системі S_l ріжучого інструменту і координатами тих же точок в системі S_0 оброблюваної деталі:

$$r_0 = A_{0, l} r_l \quad (12)$$

де $A_{0, l} = \prod_{i=1}^l A_{i-1, i}^{j_i}$

Рівняння (12) є основне рівняння теорії формоутворення, що представляє собою математичну модель ФС. Матриця $A_{0, l}$, тобто множник при r_l є матрицею перетворення всієї ФС. Права частина

рівняння (12) є функцією формоутворення.

Рівняння (12) однозначно складається за координатним кодом k формоутворювальної системи, введеним вище.

Хай для верстата код k має вигляд (6). Тоді для цього верстата матриця перетворення $A_{0,l}$ виходить підстановкою в матриці A^j на місце верхнього індексу її значень k_i з коду k , тобто

$$A_{0,l} = \prod_{i=1}^l A_{i-1,i}^{k_i} = A_{01}^{k_1} A_{12}^{k_2} \dots A_{l-1}^{k_l} \quad (13)$$

Аналізуючи швидкісний код k_v , одержуємо інформацію про значення аргументів матриць-співмножників: якщо $k_{vi} = 0$, то аргумент q в матриці $A_{i-1,i}$ завжди є величина постійна; в інших випадках q або константа, або функція часу $q(t)$.

Таким чином, моделювання механізму формування параметрів мікрогеометрії поверхні дозволяє вирішувати серію прикладних задач розробки і оптимізації технології формоутворення поверхонь тіл обертання.

1. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.

2. Богуславский Б.Л. Автоматы и комплексная автоматизация. – М.: Машиностроение, 1964. – 535с.

3. Марчук В.І., Заблоцький В.Ю. Технологічні особливості побудови та функціонування адаптивних модульних систем механічної обробки // Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за напрямком “Інженерна механіка”) - Луцьк: Луцький державний технічний університет, - 2000. Вип.8. – С. 167-170.

4. Дунин-Барковский И.В., Карташева А.И. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. 232с.