

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ ім. А. М. ПІДГОРНОГО

Бичков Микола Ігорович



УДК 519.652

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМОУТВОРЮЮЧИХ ПРОЦЕСІВ
ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНІЙ ОБРОБЦІ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ
ДЕТАЛЕЙ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем машинобудування ім. А. Н. Підгорного Національної академії наук України, м. Харків.

Науковий консультант доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Максименко-Шейко Кирило Володимирович
учений секретар ІПМаш ім. А. М. Підгорного
НАН України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Угрюмов Михайло Леонідович
професор кафедри теоретичної та прикладної
системотехніки Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна

доктор фізико-математичних наук, доцент
Литвин Олег Олегович
завідувач кафедри технологій і дизайну Української
інженерно-педагогічної академії

Захист відбудеться «5» травня 2021 року о 14.00 годині
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.01 в Інституті проблем
машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків,
вул. Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту проблем
машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків,
вул. Пожарського, 2/10.

Автореферат розіслано «2» квітня 2021 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

доктор технічних наук

 О. О. Стрельнікова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Машинобудування є одним із пріоритетних напрямків розвитку економіки України. Конкуренція в цій галузі змушує виробників приділяти підвищену увагу високошвидкісній механічній обробці складнопрофільних деталей із застосуванням обладнання з числовим програмним управлінням (ЧПУ). У зв'язку з цим виникає необхідність в розробці нових моделей формоутворення для управління цими системами. Вирішення таких завдань, в свою чергу, вимагає розгляду й аналізу моделей інтерполяції та апроксимації точково-заданих функцій, а також розробки ефективних методів, які можуть бути використані в системах ЧПУ. Широке застосування сплайнів для опису форми об'єктів виробництва в CAD-системах знаходиться в деякому протиріччі з недостатнім використанням сплайн-функцій в системах ЧПУ, що впливає на точність формоутворення. В результаті зросла потреба в дослідженнях сплайн-кривих для моделювання процесів в режимі реального часу стосовно числового управління формоутворюючим обладнанням. Тому тема дисертаційної роботи є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. В основу дисертації покладені матеріали, узагальнюючі дослідження, виконані автором в рамках бюджетних тем ПММаш ім. А. М. Підгорного НАН України: «Формоутворення, його конструкторська і технологічна підготовка в машинобудуванні» (№ ДР 0106U008611), «Математичне та комп'ютерне моделювання геометричних і кінематичних особливостей траєкторій формоутворення при технологічній підготовці виробництва в машинобудуванні» (№ ДР 0111U001755), «Розробка нових методів адаптивного управління високошвидкісним технологічним обладнанням для підвищення ефективності і якості формоутворення деталей енергетичних машин» (№ ДР 0115U001938). Результати роботи використовувалися на Харківському державному авіаційному виробничому підприємстві (ХДАВП) згідно з договорами № 346-28 «Розробка управляючого пристрою ЧПУ і виготовлення дослідного зразка для модернізації верстатів типу ФП-7МН» від 09.06.08 р., № V-3-2012 «Розробка алгоритмів математичного та комп'ютерного моделювання геометричних властивостей траєкторії формоутворення, які забезпечують режими високошвидкісної обробки на верстатах з ЧПУ» від 16.01.12 р. У зазначених науково-дослідних роботах автор приймав участь як виконавець. Результати, отримані при виконанні даних робіт, були базовими для підготовки та подання дисертації.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є створення моделі формоутворення складнопрофільних виробів при високошвидкісній обробці (ВШО) складнопрофільних деталей.

Відповідно до мети роботи було сформульовано і вирішено такі завдання:

- проведено аналіз існуючих методів моделювання формоутворюючих траєкторій при ВШО складнопрофільних виробів;
- розроблено математичні моделі лінійних і кругових формоутворюючих переміщень при ВШО складнопрофільних деталей;

- розроблено математичну модель S-образної зміни швидкості в режимах розгону і гальмування;

- створено математичну модель швидкості зони формоутворення при русі по сплайновій траєкторії для оцінки дотримання обмежень, які накладаються обладнанням з ЧПУ при ВШО;

- розроблено модель переміщення по B-сплайновій траєкторії при ВШО;

- розроблено модель переміщення по NURBS-траєкторії при ВШО.

Об'єктом дослідження є процес формоутворення складнопрофільних виробів машинобудування.

Предмет дослідження – математичні моделі та обчислювальні методи розв'язання задач інтерполяції, апроксимації та управління рухом при ВШО складнопрофільних виробів машинобудування.

Методи дослідження. Виконані дослідження базуються на загальних засадах теорії інтерполяції, апроксимації та математичного моделювання. Для побудови математичної моделі формоутворення використовувалися методи лінійної та векторної алгебри, аналітичної геометрії, теорії сплайн-функцій, методи розв'язання різницевих рівнянь. Теорія формальних та алгоритмічних систем, сучасні технології створення комп'ютерних систем управління використовувалися при синтезі складу і структури програмно-інструментальних засобів.

Наукова новизна дослідження полягає в наступному:

- вперше запропоновано модель аналітичного уявлення кожного сегмента неоднорідного раціонального B-сплайна (NURBS) у вигляді відношення поліномів з відомими коефіцієнтами, що забезпечує при ВШО виконання розрахунків менш ніж за $0,2 T_{\text{ц}}$ ($T_{\text{ц}}$ – час циклу) при значенні дискретності переміщення 10^{-7} м;

- набув подальшого розвитку метод кубічної B-сплайн апроксимації точково-заданих кривих, який, на відміну від існуючих, дозволяє виконувати сполучення сплайнів по першим і другим похідним;

- отримали подальший розвиток S-образні математичні моделі зміни швидкості зони формоутворення шляхом її подання симетричною кривою, що складається з трьох ділянок, на кожній з яких враховано обмеження швидкості і прискорення;

- отримала подальший розвиток дворівнева модель формоутворюючих переміщень, що дозволило на порядок скоротити час розрахунків переміщення обладнання при ВШО в режимі реального часу.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблену модель структури дворівневого пристрою числового програмного управління (ПЧПУ) для забезпечення високошвидкісних режимів обробки виробів реалізовано у вигляді дворівневої системи ЧПУ, яку використано при модернізації обладнання. Реалізація розробленої моделі управління формоутворюючим обладнанням у вигляді комп'ютерних програм, захищених авторським свідоцтвом № 43077 від 26.03.2012, дозволила в 2,5 рази зменшити трудомісткість виготовлення серійних авіаційних деталей при обґрунтованості і забезпеченні вимог до їх якості.

Результати дисертаційної роботи прийняті у виробництво на ХДАВП і використовуються в навчальному процесі Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ».

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові положення, результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У публікаціях [1], написаних у співавторстві, дисертантом виконано моделювання модифікованого кругового інтерполятора і подано його в програмному коді; в роботі [2] подано розроблену ним математичну модель модифікованого кругового інтерполятора, яку реалізовано у програмному коді; в роботі [3] автор описав розроблений ним метод стабілізації контурної швидкості; в [4] дисертант запропонував подати математичну модель кривої розгону у вигляді 3-х ділянок і аналітичне уявлення кожного з них, реалізував алгоритм у вигляді програмного коду; в [5] ним було запропоновано математичну модель еліптичного інтерполятора; в [6] описано математичну модель В-сплайн інтерполяції, яку реалізовано у вигляді програмного коду, з використанням якого було виготовлено серійну складнопрофільну деталь на авіаційному підприємстві; дисертантом модифіковано загальний метод кубічної В-сплайн інтерполяції, реалізовано його у вигляді програмного коду для устаткування, що експлуатується з ЧПУ [7]; в статті [8] створено методику числового експерименту, виконано програмну реалізацію, отримано результати для аналізу числових експериментів; в [9] запропоновано метод сполучення кривих при сплайн-апроксимації, який реалізовано у програмному коді, і проведено числові експерименти; в [10] удосконалено методику обчислення довжини кривої траєкторії в режимі реального часу при формоутворенні; запропоновано заміну NURBS-сплайнів на аналітичне подання при високошвидкісному формоутворенні складнопрофільних виробів [11]; розроблено математичну модель NURBS інтерполятора, реалізовано її у вигляді програмного коду [12]; в [13] розроблено структури математичної моделі об'єкта виробництва і описано процес лезової обробки в умовах промислового виробництва; в [14] запропоновано компактне подання складнопрофільної траєкторії переміщення зони формоутворення для розв'язання технічної задачі.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційних досліджень доповідалися на конференціях молодих вчених і спеціалістів ПІМаш ім. А. М. Підгорного НАН України «Сучасні проблеми машинобудування» (Харків, 2008, 2010, 2012, 2014), міжнародних конференціях «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки» (Харків, 2008, 2010, 2013, 2018, 2019).

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 24 роботах, з них 14 статей [1 - 14] в журналах і збірниках, затверджених ДАК МОН України, дев'яти тезах доповідей [15 - 23] і одному свідоцтві про реєстрацію авторського права на твір [24].

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 123 найменувань на 11 сторінках. Повний обсяг дисертації становить 155 сторінки, основний текст – 129, в них 60 рисунків, 12 таблиць, та два додатки на 5 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі досліджень, відзначено наукова новизну, теоретичну і практичну значущість

отриманих результатів. Наведено відомості про публікації та внесок автора в них, подано ступінь апробації роботи.

У першому розділі подано огляд літератури за темою дисертації. Питання моделювання формоутворення, в тому числі на обладнанні з ЧПУ, були розглянуті в роботах Н. А. Акіма, П. Безьє, Л. Піглія, К. Де Бура, З. Кокс, Ю. С. Зав'ялова, В. М. Кисельова, S. S. Yeh, Ю. А. Раїсова, В. А. Ратмірова, В. Л. Рвачова, В. Л. Сосонкіна, MY Chenga, Г. М. Мартинова. Визначено сучасний стан проблеми, обрано напрям досліджень і шляхи їх реалізації.

Моделювання процесу формоутворення на обладнанні з ЧПУ пов'язано з траєкторією та швидкістю переміщення зони, в якій відбуваються фізичні процеси з видаленням, додаванням або перерозподілом матеріалу деталі (далі по тексті — «зона формоутворення»). Модель формоутворення складається з моделі переміщення, моделі управління і стабілізації контурної швидкості, а також обмежень.

Модель переміщення складається з переміщень за такими траєкторіями:

В-сплайн:

$$\Delta X_k, Y_k, Z_k = X, Y, Z(U_{k+1}) - X, Y, Z(U_k), \quad (1)$$

$$X, Y, Z(U_k) = \sum_{i=1}^n N_{i,p}(U_k) \cdot X_i, Y_i, Z_i, \quad X, Y, Z(U_{k+1}) = \sum_{i=1}^n N_{i,p}(U_{k+1}) \cdot X_i, Y_i, Z_i, \quad (2)$$

$$N_{i,p}(U_k) = \frac{U_k - U_i}{U_{i+p} - U_i} N_{i,p-1}(U_k) + \frac{U_{i+p+1} - U_k}{U_{i+p+1} - U_{i+1}} N_{i+1,p-1}(U_k), \quad (3)$$

NURBS:

$$X, Y, Z(U_k) = \frac{\sum_{i=1}^n N_{i,p}(U_k) \cdot w_i \cdot X_i, Y_i, Z_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(U_k) \cdot w_i}. \quad (4)$$

еліптичної:

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= X_k + \Delta X_k, & \Delta X_k &= \frac{H}{k \cdot a} Y_k, \\ Y_{k+1} &= Y_k + \Delta Y_k, & \Delta Y_k &= \frac{H}{a} X_k, \\ k^2 \cdot X^2 + Y^2 &= k^2 \cdot a^2, & k &= \frac{b}{a}; \end{aligned} \quad (5)$$

лінійної:

$$\begin{aligned} X_k &= X_{k-1} + \Delta X_k, & Y_k &= Y_{k-1} + \Delta Y_k, \\ \Delta X_k &= \frac{V}{l} X_l T_{\text{ц}}, & \Delta Y_k &= \frac{V}{l} Y_l T_{\text{ц}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Обчислення швидкості в моделі формоутворення ведеться дискретно протягом одного такту

$$V = \begin{cases} at & t < t_1 \\ V_k & t_1 \leq t \leq t_2 \\ V_k - a(t - t_2) & t > t_2 \end{cases}, \quad V_{3AD} \geq \frac{dl}{dt}, \quad a_{3AD} \geq \frac{dV}{dt}, \quad (7)$$

$$\delta V \leq 10^{-2} \dots 10^{-3} \%, \quad V_x, V_y, V_z, \dots \Rightarrow V_{MAX},$$

$$a_x, a_y, a_z, \dots < a_{MAX}, \quad J_x, J_y, J_z, \dots < J_{MAX}.$$

Технічні обмеження математичної моделі формоутворення такі:

$$\delta_{разр} < 1 \text{ дискр.}, \quad (8)$$

$$T_{ц} \leq 1 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}, \quad (9)$$

$$t_{разр} < 0,2 T_{ц}. \quad (10)$$

Проведений аналіз цієї моделі показав, що при ВШО складнопрофільних деталей не забезпечуються вимоги стабільності контурної швидкості, точності формоутворення. Час розрахункових процедур залежностей (1) - (4), з урахуванням (7), (8), при ВШО перевищує обмеження (9). Тому для ВШО є актуальною необхідність розробки математичної моделі формоутворення складнопрофільних виробів машинобудування, що і визначило тему дисертаційної роботи. Дисертаційна робота є продовженням досліджень задач моделювання формоутворюючих процесів, що проводяться в ІПМаш ім. А. М. Підгорного НАН України.

Другий розділ присвячено математичному моделюванню формоутворюючих переміщень при високошвидкісній обробці.

Математична модель лінійних переміщень має вигляд

$$X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1} = X_k, Y_k, Z_k + \Delta X_k, \Delta Y_k, \Delta Z_k,$$

$$\Delta X_k, \Delta Y_k, \Delta Z_k = \text{int} \left\{ \frac{Sx_k, Sy_k, Sz_k}{l_k} \right\},$$

$$Sx_k, Sy_k, Sz_k = \text{Ost} \{ Sx_{k-1}, Sy_{k-1}, Sz_{k-1} \} + H \cdot X_k, Y_k, Z_k,$$

$$\text{Ost} (Sx_k, Sy_k, Sz_k) = Sx_k, Sy_k, Sz_k - \Delta X_k, \Delta Y_k, \Delta Z_k \cdot l_k,$$

де

X_k, Y_k, Z_k – координати точок прямої;

$\Delta X_k, \Delta Y_k, \Delta Z_k$ – приріст координат точок прямої при інтерполяції з кроком H по контуру;

l_k – довжина ділянки інтерполяції;

$\text{int} \{ * \}$ – ціла частина виразу, що стоїть в дужках;

Ost – цілочисловий залишок кроку обчислень, початкове значення $\text{Ost} = 0$.

Математичну модель лінійних переміщень отримано з використанням інтерполяційного методу цифрового диференціального аналізатора (ЦДА) з урахуванням залишків, що, на відміну від (1), забезпечує високу стабільність контурної швидкості і точність позиціонування робочих органів.

Математична модель переміщень по еліпсу виглядає так:

$$X_{k+1} = X_k \pm \frac{H}{k \cdot a} Y - \delta X_k, \quad Y_{k+1} = Y_k \mp \frac{H}{a} X_k - \delta Y_k, \quad \delta X_k = \frac{\delta R \cdot X_{k+1}}{k \cdot R}, \quad \delta Y_k = \frac{\delta R \cdot Y_{k+1}}{R},$$

$$R_{k+1} = \sqrt{X_{k+1}^2 + Y_{k+1}^2}, \quad \delta R = -\frac{U}{a}, \quad U_i = k^2 \cdot X^2 + Y^2 - k^2 \cdot a^2,$$

$$H \leq \sqrt[3]{\frac{2R^2}{\pi}}, \quad (11)$$

де X_k, Y_k – координати точок на еліпсі;
 a, b – півосі вздовж координат X, Y ;
 R – радіус еліпса в даній точці;
 δR – радіальна похибка;
 H – крок інтерполяції;
 U – оціночна функція.

На рис. 1 графічно показані результати роботи модифікованої моделі еліптичного інтерполятора.

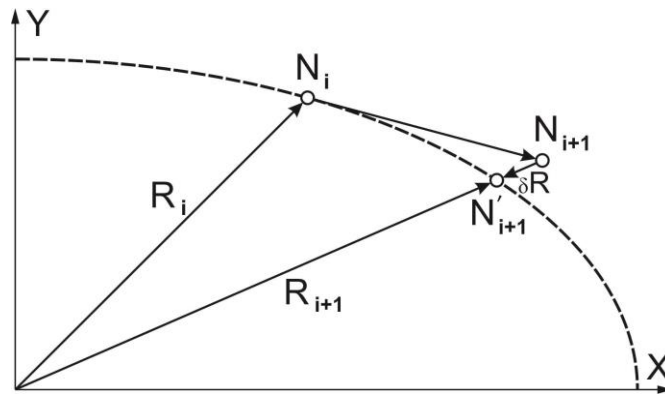


Рис. 1. Демонстрація роботи математичної моделі модифікованого еліптичного інтерполятора

Накопичена похибка по радіусу еліпса (рис. 2) при інтерполяції не перевищує однієї дискрети (рис. 3), якщо крок інтерполяції відповідає обмеженню (11), яке виконується для всіх швидкостей і радіусів, що задаються в реальній практиці. Показано, що подана математична модель забезпечує високу стабільність контурної швидкості, відхилення від якої складають менше 1%. Розроблена модель є універсальною як для еліптичних, так і для кругових траєкторій. У роботі подана дія математичної моделі еліптичної інтерполяції для кругової траєкторії. Показано, що точність розрахунку і стабільність контурної швидкості як для кругової, так і для еліптичної траєкторії ідентичні. Це говорить про необхідність заміни моделі кругової інтерполяції на математичну модель еліптичної інтерполяції.

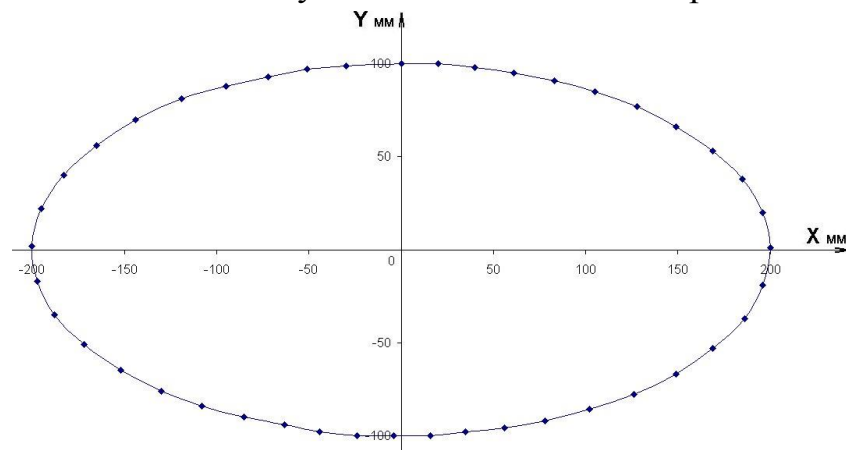


Рис. 2. Приклад інтерполяції еліпсу при $a=200$, $b=100$

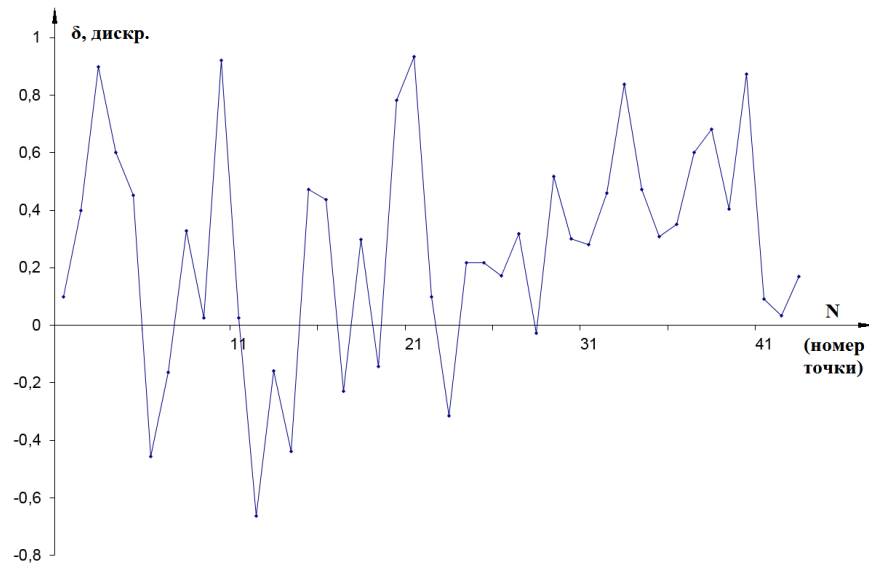


Рис. 3. Відхилення від аналітичної залежності

Математична модель переміщень по кубічній В-сплайн кривій має вигляд

$$\Delta X_k, Y_k, Z_k = X, Y, Z(U_{k+1}) - X, Y, Z(U_k), \quad U_{k+1} = U_k + \Delta U, \quad (12)$$

$$X, Y, Z(U_k) = A_{X,Y,Z} U^3 + B_{X,Y,Z} U^2 + C_{X,Y,Z} U + D_{X,Y,Z},$$

$$A_{X,Y,Z} = \sum_{j=0}^3 a_{i-j,p} X_{i-j}, Y_{i-j}, Z_{i-j}, \quad i = \overline{3, n} \quad (13)$$

де

a – коефіцієнт кубічної базисної функції для В-сплайна;

U – значення параметра $U \in (0,1)$;

U_i – точка вузлового вектора;

$X, Y, Z(U_k)$ – координати сплайн-кривої;

$\Delta X_k, \Delta Y_k, \Delta Z_k$ – приріст координат сплайн-кривої при інтерполяції з кроком

H по контуру;

X_i, Y_i, Z_i – координати точок контрольного полігону;

k – номер поточної точки в міжвузловому інтервалі;

i – номер вузла контрольного полігону;

j – номер вузла внутрішнього вузлового вектора;

p – степінь сплайна;

P_i – точка контрольного полігону;

$N_{i,p}(U)$ – базисні функції;

$\{U\}$ – вузловий вектор;

ΔU_k – приріст параметра, що відповідає значенню кроку H .

Виконання розрахунків переміщень по В-сплайновій траєкторії (2) з використанням рекурентних виразів (3) призводить до витрат часу, яке істотно перевершує встановлене обмеження (10). Крім того, в кожній точці сплайна необхідно обчислювати радіус кривизни для перевірки обмеження $A_{\max} \geq V^2 / R$. Для задоволення обмеження (10) було розроблено модель переміщення по

міжвузловому інтервалу кубічної В-сплайн траєкторії у вигляді статичного полінома (12), коефіцієнти якого розраховуються за формулою (13).

Виконано математичне і комп'ютерне моделювання переміщень по кривим, побудованим на основі загального методу В-сплайн інтерполяції і його модифікації для кубічних В-сплайнів. На ряді прикладів встановлено, що при русі по сплайн-кривій в процесі формоутворення при постійному кроці обчислень по параметру контурна швидкість не залишається постійною (відхилення від заданої величини досягають 45%). Виконання багатьох технологічних операцій, наприклад, чистової обробки, з такими змінами контурної швидкості є неприпустимим. Для таких операцій необхідно застосовувати інші методи моделювання.

Для моделювання переміщень зони формоутворення було розроблено метод обчислення В-сплайн інтерполяції точково-заданих кривих з постійною контурною швидкістю. Особливістю методу є вибір контрольного полігону і вузлового вектора такими, щоб модулі першої похідної на початку, у середині і наприкінці ділянки сплайн-кривої між двома сусідніми точками були б однакові. Метод не вимагає розв'язання системи рівнянь для визначення контрольних точок. Він забезпечує достатню для багатьох операцій точність контурної швидкості (відхилення не перевищує 10%), що вказує на перспективність його практичного застосування.

Моделювання траєкторій переміщення зони формоутворення за допомогою сплайн-кривих дозволяє вирішити завдання модифікації керуючих програм (КП) обладнання з ЧПУ, що містять велику кількість лінійних кадрів, шляхом сплайн-апроксимації або сплайн-інтерполяції.

Математична модель переміщень по NURBS-кривій має такий вигляд:

$$\Delta X, Y, Z(U_k) = X, Y, Z(U_{k+1}) - X, Y, Z(U_k),$$

$$X, Y, Z(u) = \frac{F_{X,Y,Z}(u)}{w(u)}, \quad \begin{cases} F_{X,Y,Z}(u) = A_{X,Y,Z}u^3 + B_{X,Y,Z}u^2 + C_{X,Y,Z}u + D_{X,Y,Z}, \\ w(u) = A_w u^3 + B_w u^2 + C_w u + D_w \end{cases},$$

$$\begin{cases} A_{X,Y,Z} = \sum_{j=0}^3 a_{i-j,p} w_{i-j} X, Y, Z_{i-j} \\ A_w = \sum_{j=0}^3 a_{i-j,p} w_{i-j} \end{cases} \quad (13)$$

де w_i – значення вагових коефіцієнтів у вузлах.

Для обчислення B, C, D у виразах (13) замість коефіцієнтів a_{i-j} слід використовувати $b_{i-j}, c_{i-j}, d_{i-j}$ відповідно.

Базисна функція $N_{i,3}(u)$ в міжвузловому інтервалі подається у вигляді

$$N_{i,3}(u) = A_i \cdot u^3 + B_i \cdot u^2 + C_i \cdot u + D_i.$$

Широке застосування NURBS-кривих (4) в CAD/CAM системах вказує на необхідність їх використання при моделюванні формоутворюючих переміщень. Для цього необхідно задовольнити умові (10).

Як приклад, на рис. 4 подано NURBS-криву 2-го степеня (гладка лінія 1), задану такими даними:

$$P_i = \{ (0,0), (-150, -150), (-150, 150), (0, 0), (150, -150), (150, 150), (0,0) \},$$

$$U = (0, 0, 0, 0.25, 0.5, 0.5, 0.75),$$

$$W = (1, 2, 2, 1, 2, 2, 1).$$

Тут $n = 6$, $p = 2$, число ненульових базисних функцій 2-го степеня дорівнює 7, крива складається з 4-х сегментів.

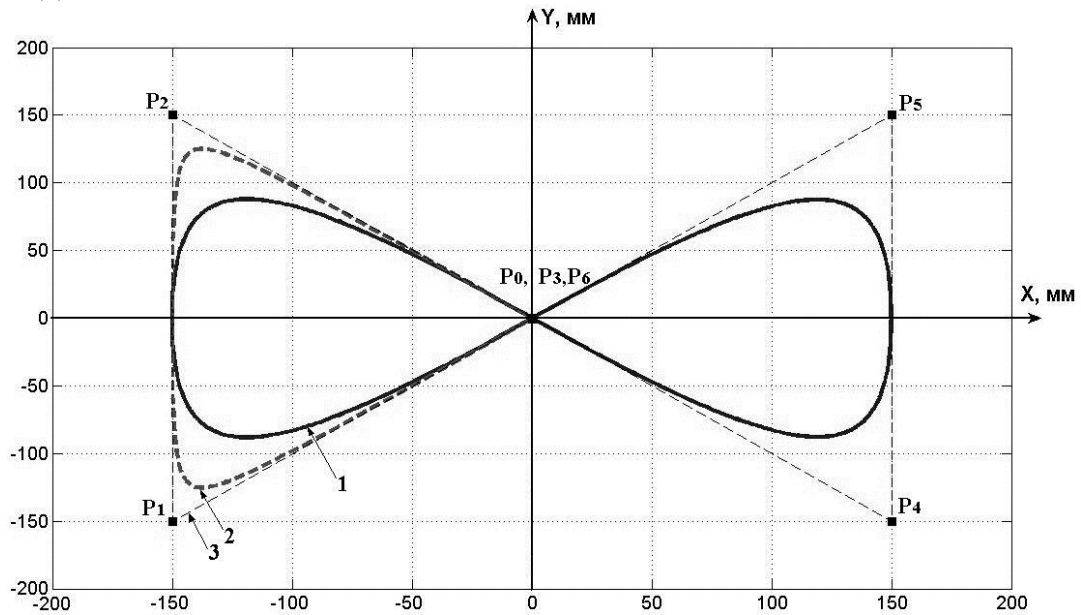


Рис. 4. Побудована NURBS-крива: 1 – з вихідними w ; 2 – зі зміненими w ; 3 – контрольний полігон

Використовуючи запропоновану в роботі методику, рівняння кривої в кожному сегменті подано у вигляді

$$X, Y(u) = \frac{B_{X,Y} u^2 + C_{X,Y} u + D_{X,Y}}{B_W u^2 + C_W u + D_W}, \quad u \in (U_i, U_{i+1}).$$

За цим виразом побудовано графіки перших похідних координат $X'(u)$ $Y'(u)$ (рис. 5).

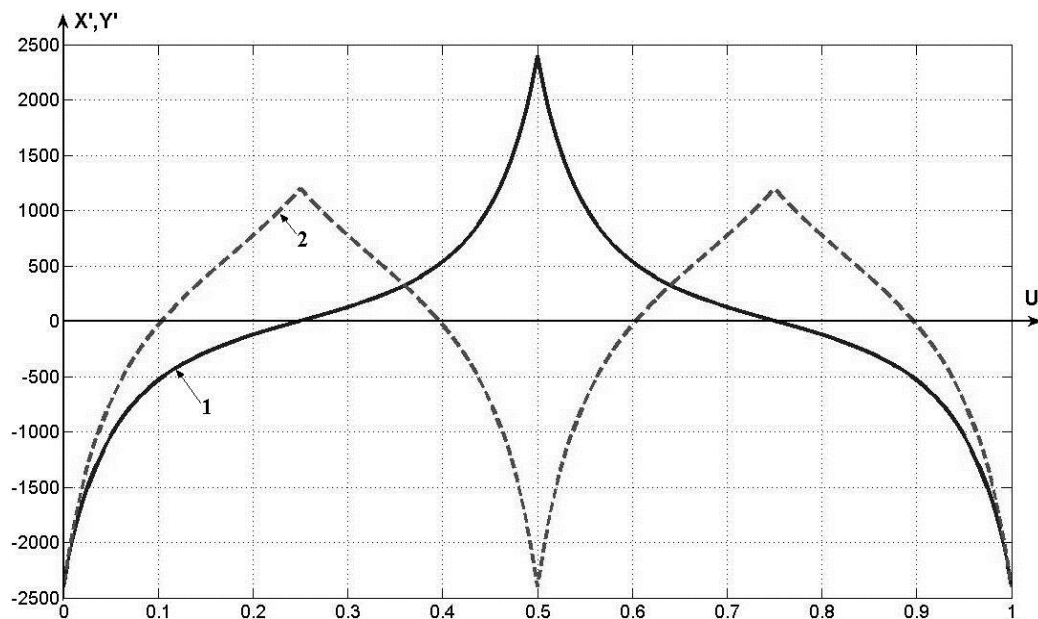


Рис. 5. Графіки зміни перших похідних координат в залежності від параметра: 1 – $X'(u)$, 2 – $Y'(u)$

Отримання аналітичних залежностей для диференціальних характеристик NURBS-кривої дозволяє виконати аналіз динамічних і кінематичних характеристик системи до початку процесів формоутворення. Це дає можливість попередньої перевірки виконання різних обмежень, що забезпечує дотримання вимог якості формоутворення.

Третій розділ присвячено математичному моделюванню швидкості і прискорення зони формоутворення.

Вимога забезпечення високої контурної швидкості призвела до необхідності використання нелінійних режимів розгону і гальмування, серед різноманіття яких виявилося корисним використання S-образних законів. Вимогами (9), (10) були продиктовані правила побудови кривої (рис. 6), яка складається з однієї лінійної A та двох нелінійних ділянок – A_1 і A_2 . Довжина першої і третьої нелінійних ділянок – однакова. Аналогічним чином виконано моделювання зміни швидкості при гальмуванні.

Розв'язання задачі зміни швидкості від початкової до заданої при відомому значенні часу і допустимому значенні прискорення руху a_{MAX} дає можливість попередньо визначити всі необхідні величини на ділянках нелінійної зміни швидкості.

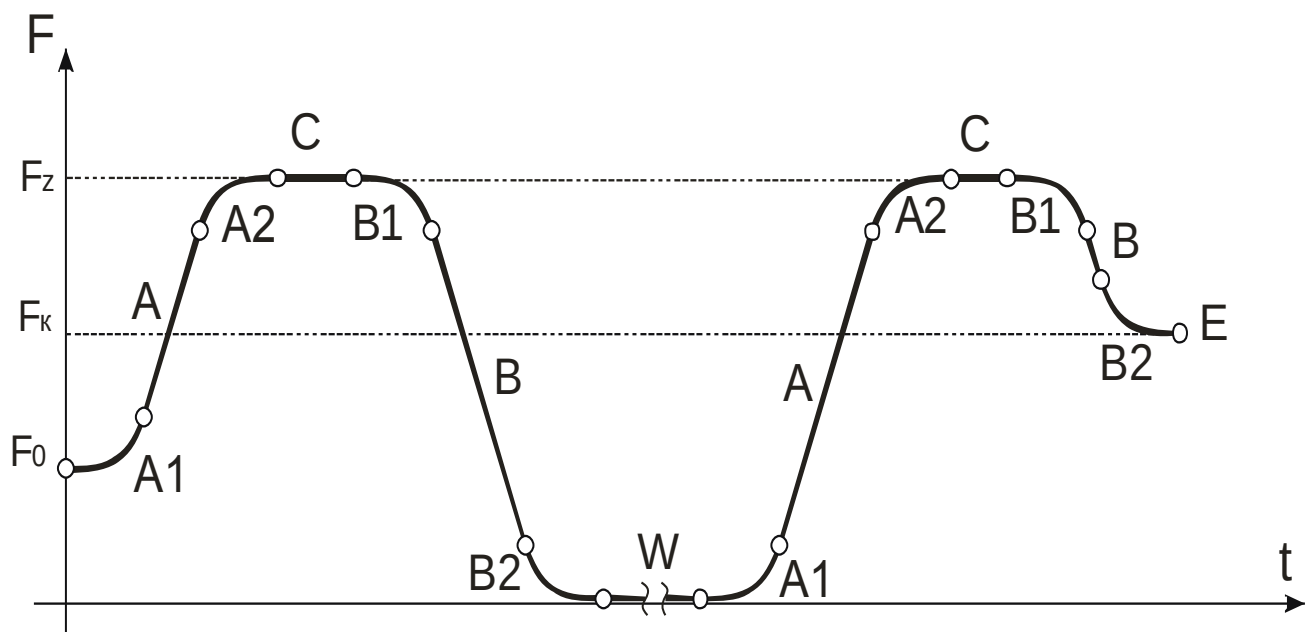


Рис. 6. S-образний закон зміни швидкості

Використання таких даних у табличному вигляді при формоутворенні згідно керуючої програми в режимі реального часу зводить час розрахунку швидкості до часу зчитування з таблиць. Цей підхід був реалізований в комп'ютерній програмі «S-control». Завдяки цьому, початок і кінець кожної ділянки зміни швидкості позбавлені від виникнення динамічних збурень через різкі зміни прискорень. Крім того, час розрахунку за таким алгоритмом є мінімальним. Це істотна перевага при обчисленнях сплайн-кривих в режимі реального часу.

Моделювання формоутворюючих переміщень із застосуванням сплайн-інтерполяції вимагає завдання довжини сплайн-кривої. Знання довжини кривої

необхідно, по-перше, для точного виходу в кінцеву точку сплайна, і, по-друге, для визначення точки початку гальмування при необхідності переходу на більш низьку швидкість. Формат завдання сплайн-кривої не містить відомостей про довжину сплайна. Обчислення довжини сплайн-кривої за методикою Сімпсона на практиці забезпечило достатню точність. Розбіжності розрахункової довжини та величини довжини кривої були враховані при організації процедур початку гальмування і виходу в кінцеву точку сплайна.

Для отримання високої якості деталі, наприклад при чистовій обробці, необхідно забезпечити сталість контурної швидкості руху інструменту. Виконання цієї умови було реалізовано визначенням величини кроку по параметру $h(U)$ до розрахунку збільшень координат з урахуванням проекцій майбутньої швидкості на осі. При цьому кожний з виразів для координатних переміщень у вузловому інтервалі подається у вигляді багаточлена степеня p . Запропонована модель формоутворюючих переміщень на базі аналітичного уявлення сплайна у вузлових інтервалах забезпечує стабільність контурної швидкості в реальному режимі часу з її відхиленнями від 10^{-3} до 10^{-4} %.

Моделювання формоутворюючих переміщень сплайн-кривої призводить до необхідності оцінки двох прискорень – тангенціального і нормального. Величина першого з них визначається заданою швидкістю і значеннями других похідних осьових переміщень, величина другого – квадратом швидкості і радіусом кривизни контуру.

Запропоновано попередню оцінку швидкісного режиму при русі по сплайн-траєкторії. Вона дозволяє встановити значення допустимих величин швидкості на всіх ділянках сплайна з урахуванням обмежень за величинами прискорень приводів подач верстата з ЧПУ, вибрати безпечний режим переміщення зони формоутворення і розглянути варіанти управління, що забезпечують різну продуктивність обладнання і якість виготовлення деталі. Приклад такого підходу для сплайнової кривої подано на рис. 7, де 1 – B -сплайн крива, 2 – контрольний полігон.

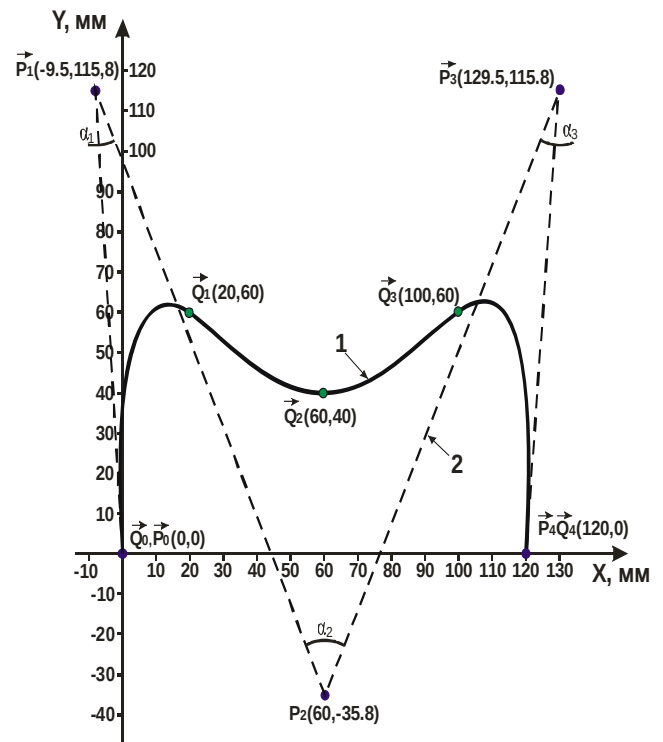


Рис. 7. Сплайн і контрольний полігон

Графік зміни допустимої швидкості подано на рис. 8. На рисунку позначено: 1 – допустима швидкість руху; 2, 3 – осьові складові тангенціального прискорення $a_x(U)$ і $a_y(U)$; 4 – модуль нормального прискорення.

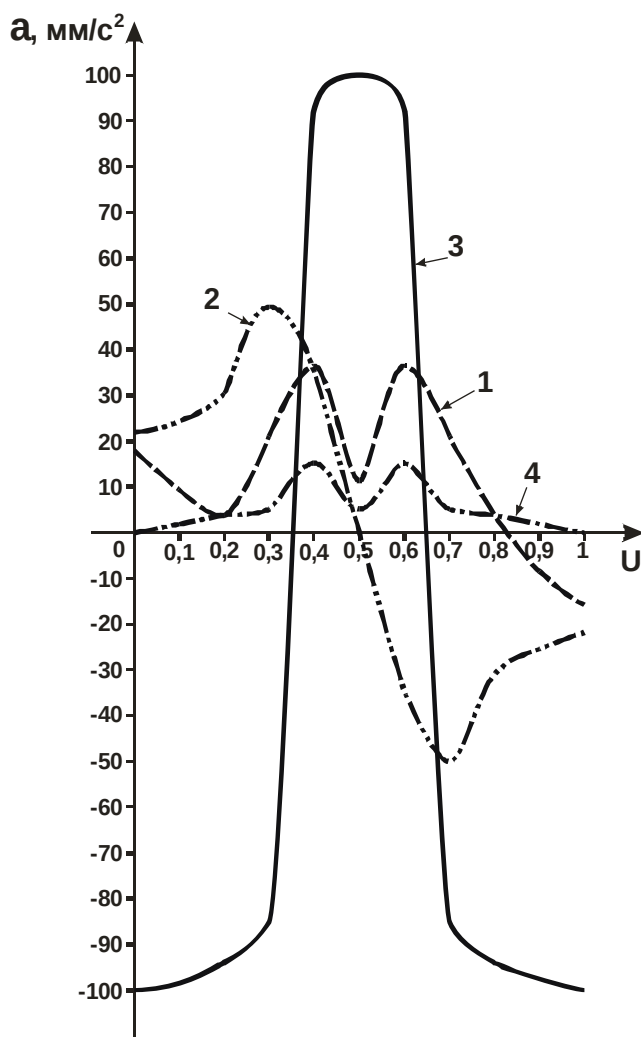


Рис. 8. Графік зміни допустимої швидкості і прискорень

Таким чином, при русі по наведеному контуру, описаному сплайном, основні обмеження швидкості обумовлені дією осьових складових тангенціального прискорення, а допустима швидкість руху по кривій (див. рис. 7) повинна регулюватися в межах від 5,5 до 40 мм/с (див. рис. 8, крива 1). Далі, для остаточного визначення профіля максимально допустимої контурної швидкості (рис. 9), використовуються: допустимі величини осьових швидкостей, розраховані з урахуванням прискорень для обраної кривої; швидкість що задана в КП; геометричні особливості траєкторії, а також беруться до уваги і сусідні ділянки, які можуть вплинути на швидкість в обчислюваній ділянці. Рішення про остаточний вибір режиму залежить від вимог технологічного процесу, функціональних можливостей пристрою ЧПУ і приводів подач обладнання.

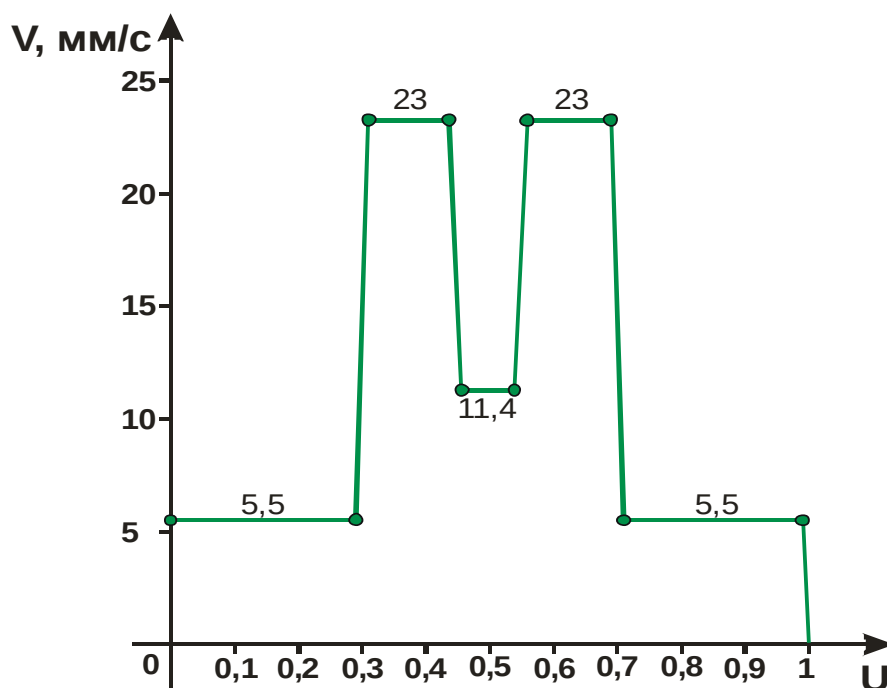


Рис. 9. Можливий профіль управління швидкістю при русі по сплайну, поданому на Рис. 7

Аналіз стратегій при ВШО дозволив розробити метод регулювання подачі, що забезпечує максимальну її швидкість з плавним регулюванням, виходячи з критерію максимального знімання матеріалу; режим управління швидкістю для забезпечення постійного навантаження на ріжучий інструмент при змінному зніманні матеріалу, виходячи з максимальної точності припуску; сталість контурної швидкості, виходячи з вимог до макро- і мікрорельєфу одержуваних поверхонь. Реалізація таких стратегій при переміщенні по сплайн-кривій в реальному режимі часу не представляється можливою у зв'язку зі значними обсягами обчислень. Тому подібні перевірки і розрахунки при моделюванні доводиться виконувати заздалегідь для всієї КП, що вказує на необхідність поділу моделі процесу формоутворення на два етапи. На першому етапі проводиться попередній аналіз, розрахунки і підготовка КП до виконання. Тут виконується від 85% до 95% обсягу всіх розрахунків. Решта завдань моделювання (розрахунок подачі за час циклу, відстеження значення відсотка подачі і реакція на нього) виконуються на другому етапі в реальному режимі часу, їх реалізація не вимагає значних апаратних і часових витрат. Реалізація такого підходу привела до формування дворівневої моделі процесу формоутворення (рис. 10).

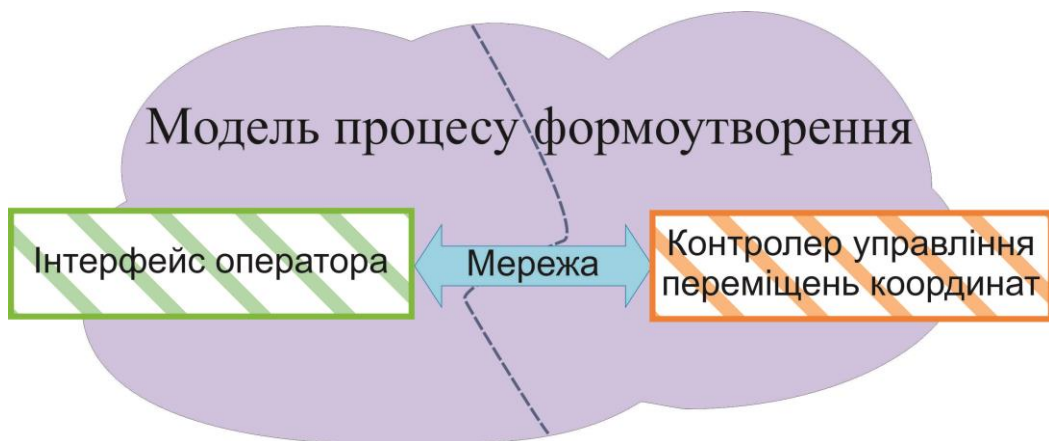


Рис. 10. Поділ функцій моделі процесів формоутворення і ЧПУ на два рівня

У четвертому розділі подано дворівневу математичну модель процесу формоутворення. На верхньому рівні виконується підготовка інформації для моделювання формоутворення і перевірка обмежень параметрів процесу. На нижньому рівні виконується моделювання контурної швидкості, формоутворюючих переміщень з використанням інтерполяційних залежностей, розрахунок динамічних характеристик, а також формування і передача завдання на цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП).

У блоці швидкості на нижньому рівні розрахунок контурної швидкості виконується для кожного такту на підставі даних, отриманих з верхнього рівня. У цьому блоці відстежується поточний стан системи. Залежно від параметрів поточної заданої і кінцевої подачі, а також залишку шляху, виконується вибір відповідного варіанту: розгін, гальмування, рух з постійною швидкістю. Отримані значення передаються в блок інтерполяції, де визначається тип руху, тактовий приріст шляху по координатам, поточний стан, розрахункові поточні швидкісні складові, приріст шляху по контуру, залишок шляху та інші параметри. Модель

контролю переміщень, отримуючи дані про задані точки, поточну швидкість, прискорення, ривок, а також про поточний реальний стан від моделі вимірювальної системи, виконує розрахунок величин керуючих сигналів для завдання переміщення по осях на ЦАП.

У розділі наведено вирішення важливого для практики формоутворення на обладнанні з ЧПУ завдання – використання КП, що розроблені раніше і містять велику кількість лінійних кадрів, шляхом сплайн-апроксимації. Застосування сплайн-кривих дозволяє вирішити завдання модифікації КП. Однак методи сплайн-апроксимації набагато складніше методів сплайн-інтерполяції і вимагають більшої обчислювальної потужності для реалізації. Практика показала, що з ростом числа вузлів сплайна час розрахунку при апроксимації збільшується в степеневій залежності, що далеко не завжди прийнятно в ЧПУ. Тоді виникає необхідність мати кілька сплайн-кривих, сполучених між собою, в тому числі і по похідним.

Розроблено методику кубічної В-сплайн апроксимації кривих, точково заданих декількома кривими з подальшим сполученням сплайнів по 1-й і 2-й похідним. Далі розглянуто методику В-сплайн апроксимації, що дозволяє створити послідовність сплайнів кривих третього ступеню. Методику засновано на використанні загального методу В-сплайн апроксимації, до якого виконано необхідні доповнення.

На рис. 11 наведено приклад побудови апроксимуючої кривої, що складається з двох секцій, і графіки перших і других похідних переміщень по осях X і Y .

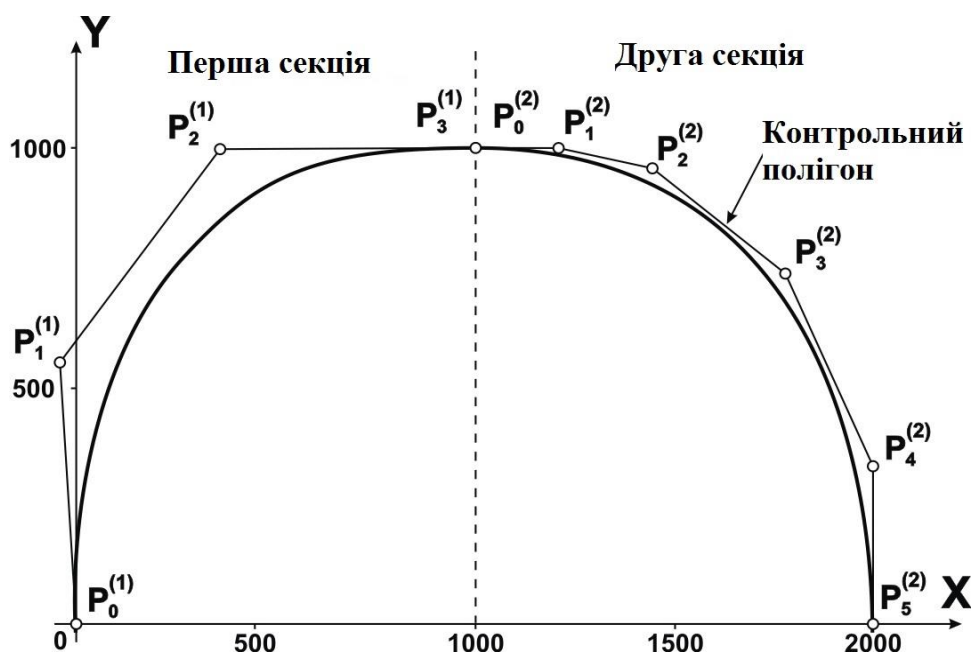


Рис. 11. Апроксимуюча В-сплайн крива, що складається з двох секцій

При сполученні кривих по першій і другій похідним зберігається неперервність сполучених кривих. Вони належать класу C^2 . Це забезпечить відсутність стрибків швидкості і прискорення в точці сполучення в процесі обробки на верстаті з ЧПУ (рис. 12).

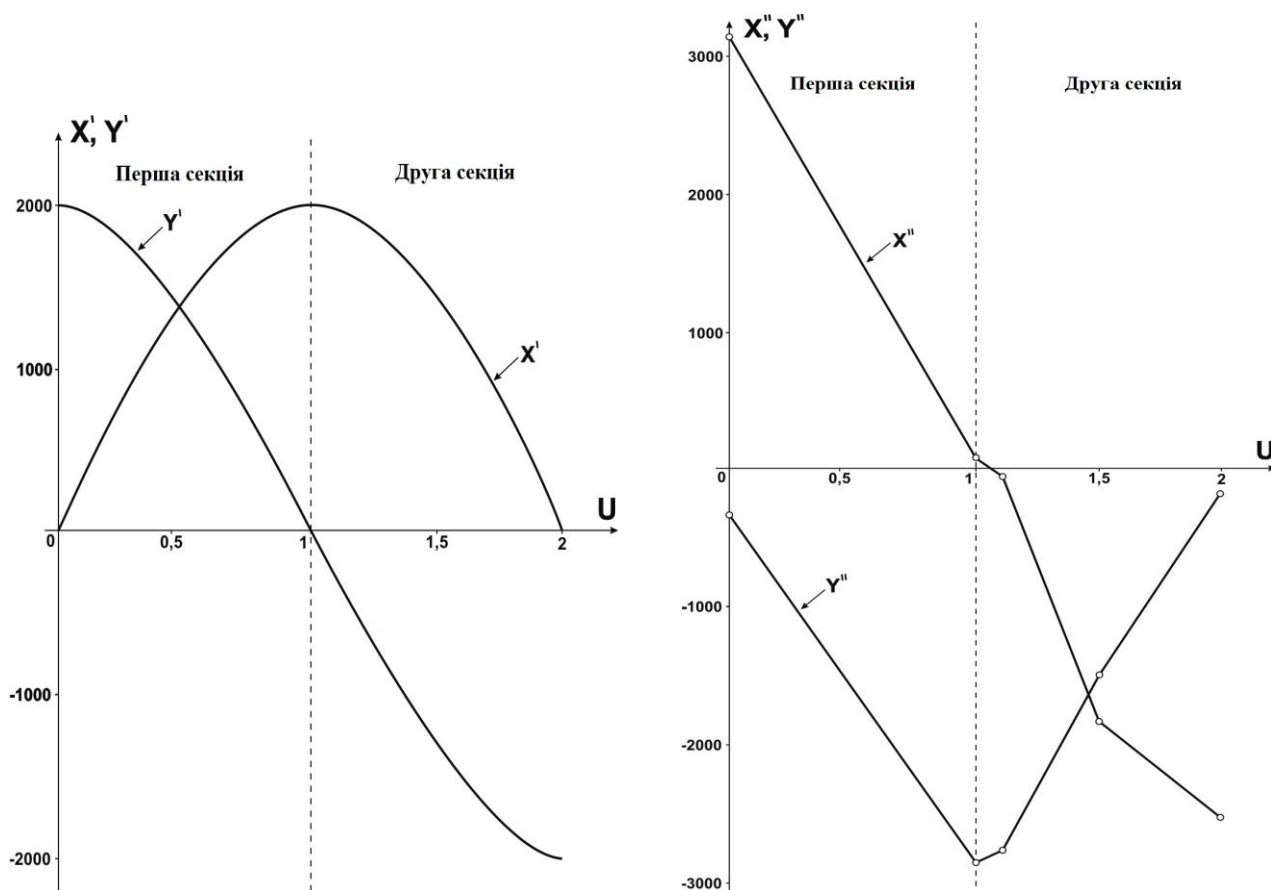


Рис. 12. Графіки перших (X' і Y') і других (X'' і Y'') похідних переміщень

Програмна реалізація алгоритму зміни швидкості «S-control», поряд з іншими математичними моделями, наведеними в роботі, послужила основою розробки пристрою ЧПУ АVI-04, який використовувався при модернізації верстата моделі ФП-7 на ХДАВП. На рис. 13 подано процес тестування обладнання, що виконувалося шляхом виготовлення серійних деталей центроплана літака АН-148.

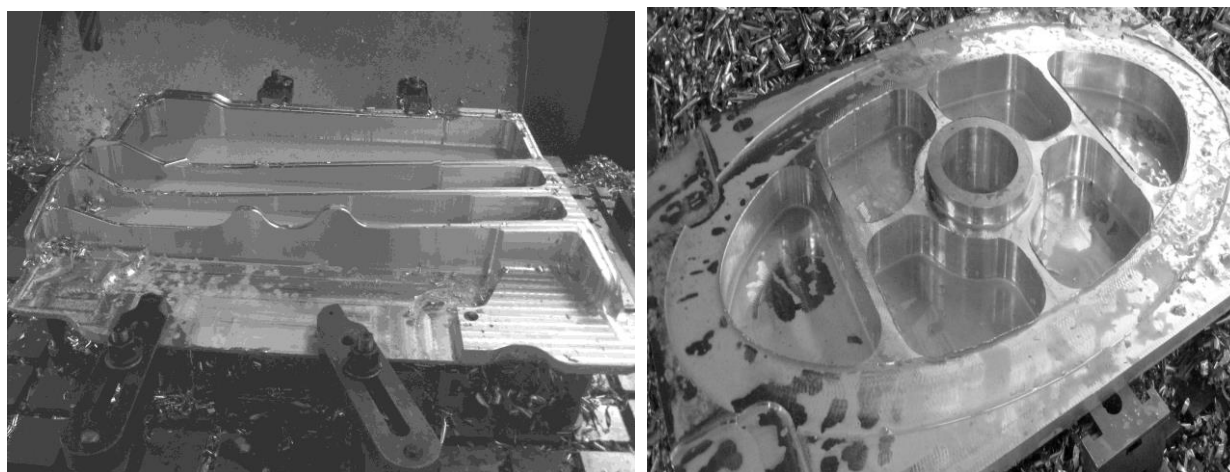


Рис. 13. Виготовлення деталей центроплана АН-148 на модернізованому верстаті ФП-7

За результатами експлуатації верстата після модернізації, технологічний час формують операцій складнопрофільних деталей, поданих на рис. 13, скоротився від 2,8 до 3,3 раз.

ВИСНОВКИ

У дисертації отримані нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності вирішують важливе завдання формоутворення складнопрофільних деталей при високошвидкісній обробці та мають перевагу перед іншими існуючими методами.

1. Вперше отримано модель аналітичного уявлення кожного сегмента NURBS-кривої у вигляді відношення поліномів з відомими коефіцієнтами, що значно спрощує і прискорює виконання інтерполяційних розрахунків і розрахунків з підтримки інтерполяції в процесі формоутворення.

2. Модифіковано метод кубічної В-сплайн апроксимації точково-заданих кривих і розроблено методику сполучення кубічних В-сплайнів по 1-й і 2-й похідним при апроксимації, що має велике значення в практиці обробки керуючих програм і при вирішенні завдань контролю відповідності портрета виробу аналітичному еталону.

3. Набув дальнійший розвиток метод обчислення кроку інтерполяції при русі по сплайн-кривій, що дозволяє отримати стабільність контурної швидкості в межах від 10^{-3} до 10^{-4} % і таку ж точність обчислення кроку інтерполяції.

4. Модифіковано математичну модель еліптичного інтерполятора, що забезпечує можливість розрахунку кругових траєкторій. Це дозволило істотно розширити спектр розв'язуваних завдань формоутворення в умовах сучасного машинобудівного виробництва.

5. Отримала подальший розвиток математична модель управління швидкістю за S-образними законами. Розроблена бібліотека програм "S-Control", призначена для планування зміни швидкості в кадрі, розрахунку поточної подачі і розрахунків змін швидкості, пов'язаних із втручанням оператора. Зареєстровано авторське право на комп'ютерну програму "S-Control".

6. Розроблено структуру моделі процесу формоутворення для забезпечення високошвидкісних режимів обробки складнопрофільних виробів, що призвело до необхідності поділу її на два рівня. Розподілено завдання між верхнім і нижнім рівнями, що дозволило реалізувати їх у вигляді програмного коду. Доведено, що такий поділ дозволяє в повному обсязі реалізувати управління обладнанням при високошвидкісній обробці.

Достовірність запропонованих математичних моделей, алгоритмів і програмного забезпечення, яке їх реалізує, а так само отриманих за їх допомогою наукових положень і результатів обчислювальних досліджень, висновків і рекомендацій підтверджується практикою при модернізації і подальшій експлуатації обладнання з ЧПУ на ХДАВП.

Впровадження на практиці розроблених комп'ютерних програм дає можливість істотно скоротити терміни і матеріальні витрати для створення виробу.

Таким чином, мету роботи було досягнуто, про що свідчить підвищення ефективності процесів формоутворення при застосуванні нових математичних моделей, методів і комп'ютерних систем, які їх реалізують, що підтверджено теоретичними дослідженнями і практичними результатами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Раисов Ю. А., Бычков И. В., Бычков Н. И., Олещук Н. В. Анализ модифицированного кругового интерполятора. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2009. № 3. С. 76-78.
2. Раисов Ю. А., Бычков И. В., Бычков Н. И. Компьютерное моделирование модифицированного кругового интерполятора. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2009. № 1. С. 54-59.
3. Раисов Ю. А., Бычков И. В., Бычков Н. И. В-сплайн интерполятор со стабильной контурной скоростью для систем ЧПУ. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2010. № 2. С. 26-31.
4. Раисов Ю. А., Бычков И. В., Бычков Н. И. Реализация S-образных законов управления скоростью подач в устройстве ЧПУ АВИ.04. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2010. № 1. С. 8-11.
5. Раисов Ю. А., Бычков И. В., Бычков Н. И. Алгоритм эллиптической интерполяции. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. сб. науч. тр. Харьков, НАКУ "ХАИ", 2010. Вып. 45. С. 141-146.
6. Раисов Ю. А., Бычков И. В., Бычков Н. И. Корректная постановка задачи формообразования при реализации В-сплайн интерполяции. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2010. № 5, 6. С. 33-39.
7. Раисов Ю. А., Бычков И. В., Бычков Н. И. Кубическая В-сплайн интерполяция точно-заданных кривых (модификация общего метода). Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2011. № 2. С. 73-78.
8. Раисов Ю. А., Бычков И. В., Бычков Н. И. Предварительная оценка скоростного режима при движении по траектории, описываемой В-сплайном. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2011. № 6. С. 10-15.
9. Раисов Ю. А., Бычков И. В., Бычков Н. И. Сплайн-аппроксимация с сопряжением кривых по производным. Проблемы машиностроения. 2012. №2. С. 45-55.
10. Раисов Ю. А., Бычков И. В., Бычков Н. И. Вычисление длины В-сплайн кривой. Проблемы машиностроения. 2012. Т. 15, № 5–6. С. 65-69.
11. Раисов Ю. А., Бычков И. В., Бычков Н. И. и др. Аналитическое представление NURBS-кривых для операций реального времени в системах ЧПУ. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2012. №6. С. 36-46.
12. Бычков И. В., Мяслица А. К., Бычков Н. И., Григорович А. М. Кинематические свойства траекторий, описанных NURBS сплайнами. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. сб. науч. тр. Харьков, НАКУ "ХАИ", 2019. Вып. 85. С. 83-95.
13. Бычков И. В., Лосев А. В., Бычков Н. И., Григорович А. М. Состояние проблемы промышленной чистоты машин и механизмов. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. сб. науч. тр. Харьков, НАКУ "ХАИ", 2017. Вып. 76. С. 57 - 67.
14. Бычков И. В., Бычков М. І. Адаптація В-сплайн інтерполятора для дворівневих ЧПК. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2019. №204. С. 75-77.

15. Бычков Н. И. Компьютерное моделирование модифицированного линейного и кругового интерполятора. Сучасні проблеми машинобудування: зб. тез. доп. конф. молодих вчених та спеціалістів, присв. 90-річному юбілею НАН України. 3 – 6 листопада 2008 р. Харків, ІПМаш НАН України, 2008. С. 36.

16. Бычков Н. И. Отладочный стенд для проверки и корректировки алгоритмов управления СЧПУ. Проблемы створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки: зб. тез. доп. Міжнар. наук.-техн. конф. Харків, 23, 24 квітня 2008 р. Харків. Харків. нац. аерокосмічний ун-т "ХАІ", 2008. С. 77.

17. Бычков Н. И. Исследования колебаний контурной скорости при реализации B-spline интерполяции. Проблемы створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки: зб. тез. доп. Міжн. наук.-техн. конф. Харків, 21, 22 квітня 2010 р. Харків: Харків. нац. аерокосмічний ун-т "ХАІ", 2010. С. 130.

18. Бычков Н. И. Моделирование S-образных законов управления скоростью подач в устройствах ЧПУ. Сучасні проблеми машинобудування: зб. тез. доп. конф. молодих вчених та спеціалістів. Харків, 8 – 11 листопада 2010 р. Харків: ІПМаш НАН України, 2010. С. 28.

19. Бычков Н. И. Применение сплайн-аппроксимации для решения задач формообразования на оборудовании с СЧПУ. Сучасні проблеми машинобудування: тез. доп. конф. молодих вчених та спеціалістів. Харків, 5 – 8 листопада 2012 р. ІПМаш НАН України, 2012. С. 30.

20. Бычков Н. И. Аналитическое представление NURBS-кривых в системах ЧПУ. Проблемы создания и обеспечения жизненного цикла авиационной техники: тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф. Харьков, 2013 г. Харьков: Харьков. нац. аэрокосмический ун-т "ХАИ", 2013. С. 70.

21. Бычков Н. И. Моделирование формообразующих движений NURBS-кривыми. Сучасні проблеми машинобудування: тез. доп. конф. молодих вчених та спеціалістів. Харків, 17 – 20 листопада 2014 р. Харків, ІПМаш НАН України, 2014. С. 22.

22. Бычков Н. И. Аппроксимация и коррекция NURBS-кривых посредством весовых коэффициентов. Проблемы створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки: тези доп. Міжнародної наук.-техн. конф. Харків, 2018 р. Харків: Харків. нац. аерокосмічний ун-т "ХАІ", 2018. С. 42.

23. Бычков Н. И. Применение NURBS-интерполяции для минимизации ликвидов при чистовой лезвийной обработке деталей. Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки»: тези доп. Х.: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2019. С. 41.

24. Свідоцтво № 42968 про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «S-Control» / І. В. Бичков, М. І. Бичков (Україна). Заявлено № 43077 от 26.01.2012. Опубл. 26.03.2012.

АНОТАЦІЯ

Бичков М. І. Математичне моделювання формоутворюючого процесів при високошвидкісній обробці складнопрофільних деталей. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Інститут проблем машинобудування імені А. М. Підгорного НАН України, Харків 2021.

У дисертації створено математичну модель процесу формоутворення виробів при високошвидкісній обробці на серійних підприємствах.

Дисертація містить результати теоретичних та експериментальних досліджень. Застосування різних видів сплайн-інтерполяції дозволило значно скоротити обсяг керуючих програм, підвищити продуктивність обладнання при дотриманні всіх вимог до якості деталей. Використання сплайн-апроксимації дозволяє вирішувати завдання заміни кусочно-лінійних траєкторій на сплайни в керуючих програмах, а також завдання контролю складнопрофільних поверхонь виробів. Експериментальні дослідження проведено на фрезерних верстатах з ЧПУ в умовах серійного виробництва. У процесі тестування були виготовлені серійні деталі авіаційного виробництва, які пройшли контроль ВТК. Обробка отриманих результатів реалізована із застосуванням методів комп'ютерного моделювання.

Результати роботи передані для застосування на ХДАВП, а також використовується в навчальному процесі Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського "ХАІ".

Ключові слова: В-сплайн інтерполяція, NURBS інтерполяція, формоутворення, В-сплайн апроксимація, математичне моделювання, контурна швидкість, радіус кривизни.

АННОТАЦИЯ

Бычков Н. И. Математическое моделирование формообразующих процессов при высокоскоростной обработке сложногопрофильных деталей. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы – Институт проблем машиностроения имени А.Н.Подгорного НАН Украины, Харьков 2021.

В диссертации решена задача создания математической модели процесса формообразования изделий при высокоскоростной обработке на серийных предприятиях.

Диссертация содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований. В работе приведена модель формообразования при высокоскоростной обработке, которая оказывается необходимой при описании процессов для сложногопрофильных деталей, поскольку моделирование таких процессов в большинстве современных CAD/CAM-систем завершается расчётом траектории режущего инструмента. А все параметры движения (скорость, ускорение и т.п.) назначаются зачастую без учёта реальных возможностей

оборудования. Это требует наложения соответствующих ограничений при разработке управляющих программ. В модель формообразования включены следующие траектории: NURBS, В-сплайн, эллиптическая, и как частный её случай круговая, а также линейная. Применение различных видов сплайн-интерполяции позволило значительно сократить объём управляющих программ, повысить производительность оборудования при соблюдении всех требований к качеству деталей. А использование сплайн-аппроксимации позволяет решать задачи замены кусочно-линейных траекторий на сплайны в управляющих программах, а также задачи контроля сложнопрофильных поверхностей изделий. Представлена S-образная модель изменения скорости при разгоне и торможении, программная реализация которой защищена свидетельством о регистрации авторского права на интеллектуальную собственность. Экспериментальные исследования проведены на фрезерных станках с ЧПУ в условиях серийного производства. В процессе тестирования были изготовлены серийные детали авиационного производства, которые прошли контроль ОТК. Обработка полученных результатов реализована с применением методов компьютерного моделирования.

В диссертации получены следующие научные и практические результаты.

Была впервые предложена модель аналитического представления каждого сегмента NURBS-кривой в виде отношения полиномов с известными коэффициентами, что обеспечивает при ВСО выполнение расчетов менее чем за $0,2 T_{\text{ц}}$ ($T_{\text{ц}}$ – время цикла) при значении дискретности перемещения 10^{-7}м .

Получил дальнейшее развитие метод кубической В-сплайн аппроксимации точечно-заданных кривых, который, в отличие от существующих, позволяет выполнять сопряжение сплайнов по первым и вторым производным.

Получила дальнейшее развитие двухуровневая модель формообразующих перемещений, что позволило на порядок сократить время расчетов перемещения оборудования при ВСО в режиме реального времени.

Разработана модель структуры двухуровневого ЧПУ для обеспечения высокоскоростных режимов обработки изделий. Она реализована в виде двухуровневой системы, которая использована при модернизации оборудования. Реализация разработанной модели управления формообразующим оборудованием в виде компьютерных программ, защищенных свидетельством о регистрации авторского права на интеллектуальную собственность № 43077 от 26.03.2012, позволила в 2,5 раза уменьшить трудоемкость изготовления серийных авиационных деталей при обоснованности и обеспечении требований к их качеству.

Результаты работы переданы для применения на ХГАПП, используется в учебном процессе Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”.

Ключевые слова: В-сплайн интерполяция, NURBS интерполяция, формообразование, В-сплайн аппроксимация, математическое моделирование, контурная скорость, радиус кривизны.

ABSTRACT

Bychkov N. I. Mathematical modeling of the forming process in the high-speed machining of complex profile parts. – The Manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 01.05.02 - Mathematical modeling and computational methods - A. Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv 2021.

The dissertation solves the problem of creating a mathematical model of the process of forming parts during high-speed processing at serial enterprises.

The dissertation contains the results of theoretical and experimental research. The use of various types of spline interpolation has significantly reduced the volume of control programs, increased equipment performance, and increased compliance with all requirements for the quality of parts. The use of spline approximation allows us to solve the problems of replacing piecewise linear trajectories with splines in control programs, as well as the problems of controlling complex product surfaces. Experimental studies were carried out on CNC milling machines in the conditions of mass production. During the testing process, serial parts of aircraft production were manufactured, which passed the control of the technical control department. Processing of the obtained results is implemented using computer modeling methods.

The results of the work were transferred for use at the KhGAPP, which is used in the educational process of the National Aerospace University named after M. Ye. Zhukovsky "KHAI".

Keywords: B-spline interpolation, NURBS interpolation, shaping, B-spline approximation, mathematical modeling, contour velocity, radius of curvature.