

МИРОНЕНКО Є.В., КОВАЛЬОВ В.Д., ВАСИЛЬЧЕНКО Я.В., КЛИМЕНКО Г.П., ФАДЕЄВ В.А., ШАПОВАЛОВ М.В.

МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТОЧНОСТІ ПРИ ЧИСТОВОМУ ЗУБОФРЕЗУВАННІ

У статті розглянуто новий підхід до прогнозування похибок механічної обробки зубчастих коліс базується на принципах суперпозиції, векторному характеру складових похибки і методі статистичного математичного моделювання методом Монте – Карло. Відмінністю реального формоутворення від номінального (ідеального) є наявність відхилень геометрії реальних профілів від номінальних. Основними кінцевими завданнями, які повинні бути вирішені при дослідженні закономірностей реального формоутворення, є задачі прогнозування з заданою вірогідністю виникаючих похибок. Аналіз механізмів формування похибок зубчастих коліс свідчить про те, що елементарні похибки технологічних систем операцій зубообробки характеризуються випадковими числовими характеристиками, що визначають величину і характер входження у відповідні комплексні складові, які, в свою чергу, взаємодіючи між собою, визначають досліджувані похибки зубчастих коліс.

Ключові слова: імітаційне математичне моделювання, зубофрезерування, прогнозування похибок, зубчасті колеса, механічна обробка, принцип суперпозиції

MIRONENKO E.V., KOVAL'OV V.D., VASILCHENKO YA.V., KLYMENKO G.P., FADEEV V.A., SHAPOVALOV M.V.
SIMULATION OF PRECISION PARAMETERS IN FINISH GEAR MILLING

The article describes a new approach to forecasting errors in the machining of gears based on the principles of superposition, the vector nature of the components of error and statistical method of mathematical modeling by Monte Carlo. The difference between the real shaping of the nominal (ideal) is the presence of deviations of the geometry of the real profiles from the nominal. The major tasks that need to be solved in the study of real regularities of morphogenesis are forecasting problem with a given accuracy errors occur. Analysis of mechanisms of formation of the errors of the gears indicates that basic errors of process systems operations gears are characterized by a random numerical values, which determine the amount and nature of occurrences in the corresponding integrated components that, in turn, interact to determine the investigated error of gears.

Keywords: simulation mathematical modeling, gear milling, forecasting errors, gears, machining, principle of superposition

Вступ. Загальна імітаційна модель формування похибок при зубообробці лезовим інструментом. Розглянемо новий підхід до прогнозування похибок механічної обробки зубчастих коліс (ЗК), що базується на принципах суперпозиції, векторному характері складових похибки та метод статистичного математичного моделювання методом Монте - Карло. Відмінністю реального формоутворення від номінального (ідеального) є відхилення геометрії реальних профілів від номінальних.

Мета дослідження. Основними кінцевими завданнями, які мають бути вирішені при дослідженні закономірностей реального формоутворення, є завдання прогнозування із заданою достовірністю похибок, що виникають, а також завдання управління, у тому числі оптимального цими похибками.

Основна частина. Відповідно до чинного ГОСТ1643 – 81 похибки виготовлення зубчастих коліс [1, 4] рівня забезпечення точності не нижче, ніж необхідна, можуть бути сформульовані у вигляді (1)

$$ES_i \leq EI_i \leq f\Delta i(\alpha) \quad (1)$$

де $f\Delta i(\alpha)$ – функція залежності i - й похибки зубчастого вінця (ЗВ) від фазового кута реального профілю зубчастого колеса (α); ES_i – мінімальне значення i – і похибки; EI_i – максимальне значення i – і похибки..

Таким чином, вимоги до точності виготовлення ЗК щодо забезпечення, наприклад, кінематичної точності повинні складатися з обмежень на радіальне биття та коливання довжини загальної нормалі (згідно з ГОСТ 1643 – 81) та двох функціональних залежностей радіального биття та коливання довжини загальної нормалі від фазового кута повороту ЗК (2) та (3)

$$EI_{Frr} \leq ES_{Frr} \leq f_{Frr}(\alpha), \quad (2)$$

$$EI_{Fwr} \leq ES_{Fwr} \leq f_{Fwr}(\alpha) \quad (3)$$

Аналіз механізмів формування похибок ЗК свідчить про те, що елементарні похибки технологічних систем операцій зубообробки характеризуються випадковими числовими характеристиками, що визначають величину та характер входження у відповідні комплексні складові, які, своєю чергою, взаємодіючи між собою, визначають досліджувані похибки ЗК.

Оскільки досліджувані похибки обробки виникають у результаті впливу низки випадкових чинників, характеристики яких, залежно від рівня складності структурної будови похибок, є величинами чи функціями, які мають випадковий характер прояви, їх визначення можливе з допомогою методів теорії ймовірностей.

Відповідно до цього, на вирішення цього завдання, з підвищення об'єктивності одержуваної інформації, економії тимчасових і матеріальних витрат, найбільш доцільним є застосування методики статистичного моделювання (методу Монте – Карло) [4].

Виходячи з викладеного вище, розроблено загальну модель формування ЗК при механічній обробці, геометрична інтерпретація якої показана на рис. 1.

Відповідно до запропонованої моделі, профіль виробу при механічній обробці є результатом перетину просторових множин А і В (4)

$$C = A + B. \quad (4)$$

Просторові множини утворюються за принципом суперпозиції в результаті імітаційного підсумовування векторів елементарних складових технологічних похибок.

Для побудови розрахункової схеми статистичного моделювання стохастичної моделі елементарні технологічні похибки розбиваються на три види: похибки, що зсувають ЗК в площині обробки і тим самим створюють геометричний ексцентриситет, що перекошують похибки, що створюють перекіс площини обробки ЗК і похибки, що повертають площину обробки і створюють.

Далі, згідно з розрахунковою схемою (рис. 2), моделювання похибки обробки ЗК виконується на основі розрахунку кінематичного ексцентриситету у 2 етапи:

1. Відбувається моделювання положення ЗК у верстатній системі: а) моделюється скалярне значення вектора j – й технологічної похибки, який розраховуватиметься:

за (5), якщо похибка розподілена відповідно до закону рівної ймовірності

$$m(E_j) = R_{[0,1]} E_j. \quad (5)$$

де $m(E_j)$ – моделируемое значение элементарной составляющей погрешности;

$R_{[0,1]}$ – равномерно распределенная на интервале $[0,1]$ случайная величина;

E_j – величина элементарной составляющей погрешности

– по (6) при любом другом виде закона распределения E_j

$$\int_{-\infty}^{m(E_j)} f(E_j) dE = R_{[0,1]}, \quad (6)$$

де $f(E_j)$ – функция плотности вероятности распределения случайной величины элементарной составляющей погрешности.

Загальна імітаційна модель формування хиб при зубообробці лезовим інструментом. Розглянемо новий підхід до прогнозування помилок механічної обробки зубчастих коліс (ЗК), що базується на принципах суперпозиції, векторному характері складових помилок та метод статистичного математичного моделювання методом Монте - Карло.

Відмінністю реального формоутворення від номінального (ідеального) є відхилення геометрії реальних профілів від номінальних.

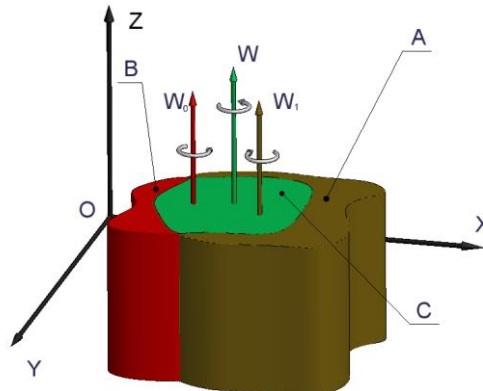


Рис. 1 – Загальна модель формування ЗК при механічній обробці: А – просторовий профіль обробного контуру; В – просторовий профіль оброблюваного контуру; С – просторовий профіль утвореного контуру виробу; W0 - вісь концентрації оброблюваного контуру; W1 – вісь концентрації обробного контуру; W – вісь концентрації утвореного контуру виробу

При цьому необхідно, щоб змодельована випадкова величина $m(E_j)$ ймовірно (при $n \rightarrow \infty$) сходилася до шуканої величини E_j , тобто. для будь-якого нескінченно малого $\varepsilon > 0$ повинно виконуватись співвідношення (7)

$$\lim_{m \rightarrow \infty} P \left[\sum_{i=1}^m (m(E_j) - E_{jr})_m < \varepsilon \right] = 1, \quad (7)$$

де P – відповідна ймовірність;
 m – кількість змодельованих значень;
 E_{jr} – шукана (реальна) величина елементарної складової похибки;
 б) моделювання кутових положень векторів Q_j (рис. 2)

$$m(\gamma_j) = R_{[0;1]} 360^\circ = R_{[0;360^\circ]}, \quad (8)$$

де $R_{[0;1]}$, $R_{[0;360^\circ]}$ – відповідно рівномірно розподілена випадкова величина на інтервалах $[0, 360^\circ]$, $[0, 1]$;
 $m(\gamma_j)$ – значення кута повороту вектора j – й складової похибки, що моделюється.

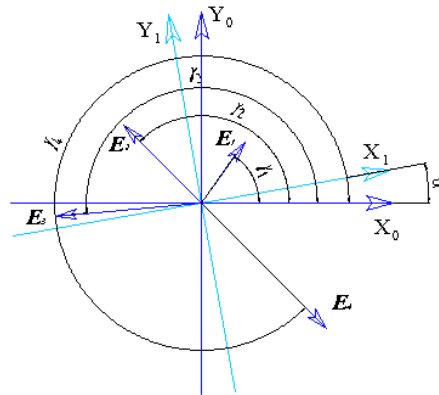


Рис. 2 - Розрахункова схема кінематичного ексцентриситету похибки обробки ЗК

2. Виробляється моделювання обробки ЗК:

Для цього виконується поворот осей координат на кут α , і цим відтворюється рух обкату, що виникає при обробці ЗК. При цьому ексцентриситет E (зсув площини обробки ЗК) дорівнює сумі проєкцій всіх ексцентриситетів на вісь X (9):

$$E(\alpha) = \sum_{j=1}^m (E_j \cos(\gamma_j - \alpha)). \quad (9)$$

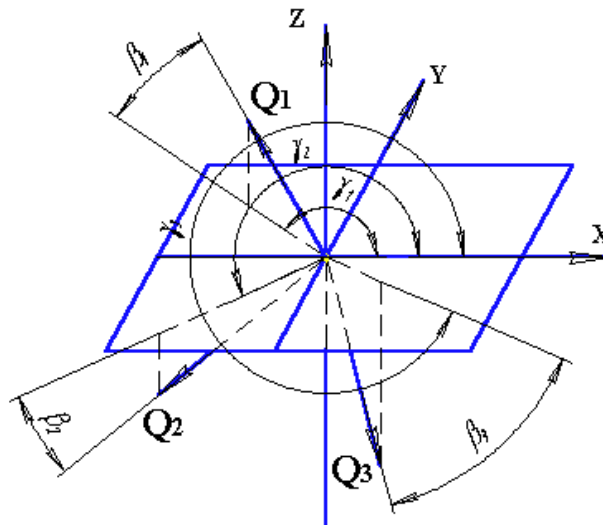


Рис. 3 – Розрахункова схема перекосу площини обробки: Q_j – нормальні вектори площин перекосу; β і γ кути, що характеризують їхнє положення в просторі щодо площини обробки ЗК

Тим самим, зробивши повний обіг координатних осей від 0о до 360о, отримаємо функціональну залежність ексцентриситета від фазового кута повороту зубчастого колеса $E(\alpha)$ (рис 4, а).

Розрахунок сумарного перекосу поверхні обробки Q проводиться за схемою, представленою на рис 3.

Сумарний перекіс визначається аналогічно до моделювання ексцентриситету:

1. Проводиться моделювання положення ЗВ у верстатній системі:

а) моделюється скалярне значення нормального вектора j – й площини перекосу за аналогією з (5 □ 7);

б) моделюється кутове x положень цих векторів $m(\gamma_j)$ і $m(\beta_j)$ по (10 и 11)

$$m(\gamma_j) = R_{[0;1]} 360^\circ, \quad (10)$$

$$m(\beta_j) = R_{[-90^\circ;90^\circ]}, \quad (11)$$

де $R_{[0, 360^\circ]}$, $R_{[0,1]}$, $R_{[-90^\circ, 90^\circ]}$ – відповідно рівномірно розподілена на інтервалах $[0,360^\circ]$, $[0,1]$, $[-90^\circ,90^\circ]$ випадкові величини;

$m(\gamma_j)$, $m(\beta_j)$ – моделювані значення характеристичних кутів j – про технологічний перекося.

2. Виробляється моделювання обробки ЗК:

Перекіс площини обробки призводить до виникнення вертикальної та горизонтальної складових похибки профілю ЗК (12 и 13)

$$Q_B(\alpha) = \sum_{j=1}^m (Q_j \sin(\beta_j) \cos(\gamma_j - \alpha)), \quad (12)$$

$$Q_G(\alpha) = \sum_{j=1}^m (Q_j \cos(\beta_j) \cos(\gamma_j - \alpha)). \quad (13)$$

Якщо досліджувана похибка носить лише радіальний характер як Q , то призначається Q_G . Тим самим, зробивши повний оборот координатних осей від 0 до 360о, отримаємо функціональну залежність перекосу Q від фазового кута повороту ЗК (рис 4, б).

Моделювання третього типу похибок відбувається так:

1. Виконується моделювання значення похибки P_j згідно (4 □ 6).

2. Виконується моделювання початкового фазового кута (14)

$$m(\varphi_j) = R_{[0,1]} \frac{\pi}{2} = R_{[0, \frac{\pi}{2}]}, \quad (14)$$

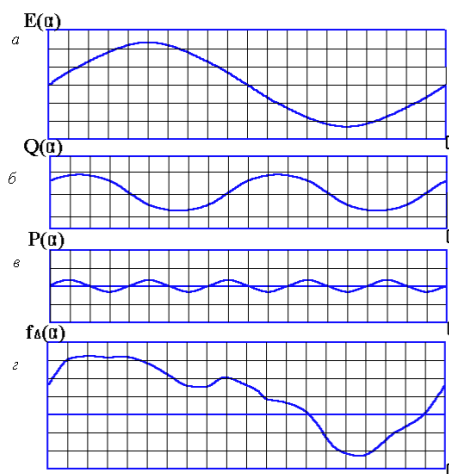


Рис. 4 – Схема формування функціональної залежності похибок вінця (E , Q , P , f_b) від фазового кута повороту ЗК

3. Виконується моделювання обробки ЗК (15)

$$P(\alpha) = \sum_{j=1}^m (P_j \cos(\varphi_j + \alpha T)) \quad (15)$$

де T – період коливань $T=2\pi/z$; z - Число зубів досліджуваного ЗК.

Таким чином, зробивши повний оборот координатних осей ЗК від 0° до 360° отримаємо функціональну залежність кінематичного ексцентриситету P від фазового кута повороту зубчастого колеса (рис 4, в).

Користуючись принципом суперпозиції, отримаємо функціональну залежність похибки вінця від фазового кута повороту ЗК $f\Delta(\alpha)$ (16)

$$f\Delta(\alpha) = E(\alpha) + Q(\alpha) + P(\alpha). \quad (16)$$

Приклад результатів моделювання представлений (рис 4, г).

Проведений аналіз апріорних уявлень про об'єкт моделювання дозволив виділити найзначніші інформативні параметри процесу обробки.

Відомо, що специфіка черв'ячного зубофрезерування [2, 3] полягає в тому, що характер динамічних параметрів обробки значною мірою обумовлюється зміною в часі геометричних та кінематичних характеристик (товщини зрізаних шарів та величин кінематичних передніх та задніх кутів для всіх точок периметру ріжучих кромки). зубів черв'ячної фрези), (17)

$$\vec{D}_i = \sum_{i=1}^{z_0} \sum_{j=1}^{z_i} \int_L \vec{D}(a_i, \alpha_i, \gamma_i) dl, \quad (17)$$

де \vec{D}_i – вектор динамічних параметрів процесу обробки;

z_0 – число рейок черв'ячної зуборізної фрези;

z_i – число зубів i -ї рейки фрези;

a_i – миттєва товщина зрізаного шару в точці ріжучої кромки, що розглядається;

α_i та γ_i – миттєві значення кінематичних переднього та заднього кутів для розглянутої точки;

L – параметр ріжучої кромки.

Завдання структурної та параметричної ідентифікації моделей виду (17) за експериментальними даними є завданням надзвичайно великої розмірності, що не має єдиного рішення. Численні теоретичні та експериментальні дослідження (зокрема, роботи В.М. Башкирова, К. Ziegler, G. Sulzera та ін.) свідчать про наявність значущого монотонного зв'язку між площею шару, що зрізається зубами фрези, та динамічними параметрами процесу обробки.

Як інтегральну характеристику стану процесу обробки, як правило, використовується миттєва площа шару F_t , що зрізається кожним із зубів фрези. Тоді модель (17) може бути представлена у вигляді (18)

$$F_t = \sum_{i=1}^{z_0} \sum_{j=1}^{z_i} \int_L a_i dl. \quad (18)$$

Характер зв'язку між параметрами та F_t дозволяє припустити наявність аналогії між уявленнями цих сигналів у частотній області. Крім того, розроблені методи дозволяють визначити миттєві значення $\square l$, $\square l$ та $\square l$ для будь-якої точки будь-якого зуба фрези.

У моделі враховано особливості процесу обробки, зумовлені такими факторами: фактичною формою ріжучих кромки (схемою різання, типом черв'яка); кутами установки фрези, нахилу стружкових канавок, підйому витків фрези; числом заходів та рейок фрези; кутом нахилу та числом зубів колеса тощо. Формування моделі як комплексу формальних методів і алгоритмів дозволяє автоматизувати процес дослідження.

Метод та алгоритм побудови математичної моделі черв'ячної зуборізної фрези. Ріжуча кромка зуба фрези є плоским «примітивом» – упорядкованим списком точок площини, заданих їх координатами у системі координат (СК) $X_k Y_k$, пов'язаної із зубом фрези (рис. 5).

Кількість типів примітивів залежить від схеми різання черв'ячної фрези, кількість точок у кожному з примітивів визначається конструкцією фрези та заданою точністю опису [2, 4]. Черв'ячна зуборізна фреза є «комплексом примітивів», кількість та просторове розміщення яких у СК фрези $XQYQZQ$ визначається типом та конструкцією фрези (рис. 5). Розміщення моделі фрези в СК $XZYZZZ$, пов'язаної із заготівлею (рис. 6), проводиться на основі методу початкового позиціонування і полягає у призначенні початкових координат центру СК $XQYQZQ$ в СК $XZYZZZ$.

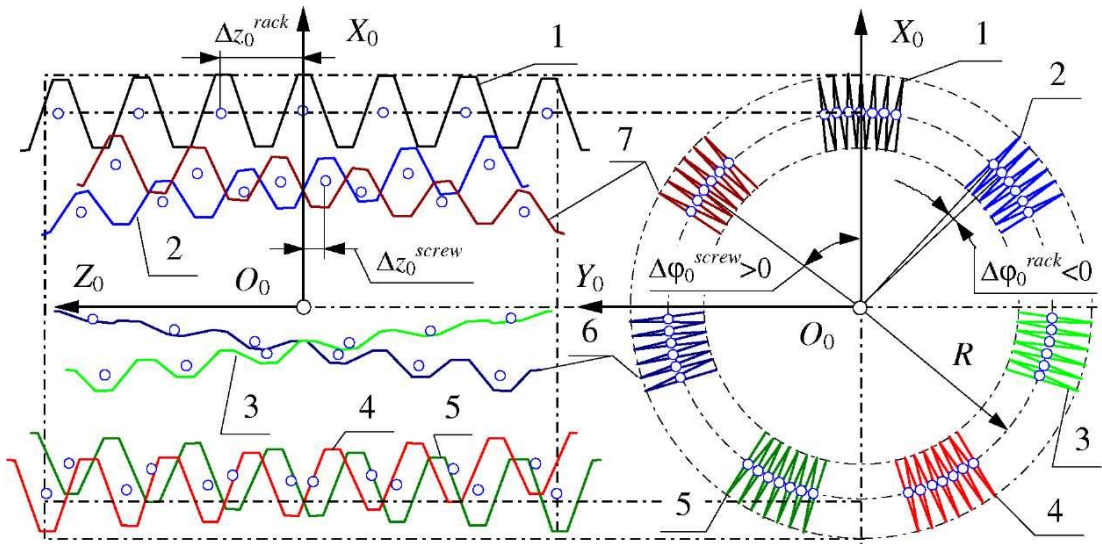


Рис. 5 – Графічне представлення математичної моделі двозахідної правозахідної черв'ячної зуборізної фрези

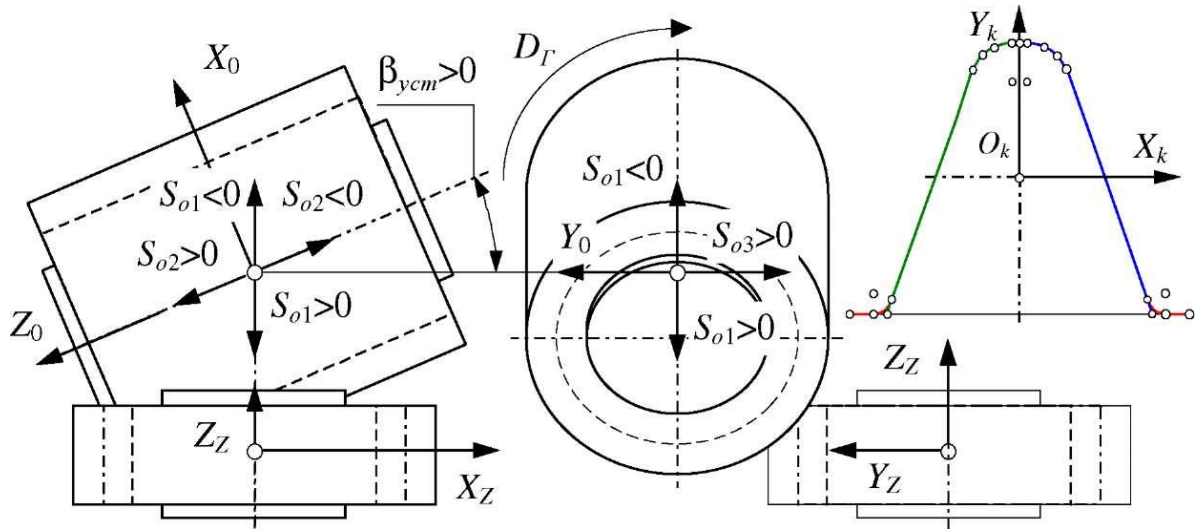


Рис. 6 – Системи координат та угоди про знаки рухів подачі

Моделювання переміщення фрези здійснюється за допомогою «алгоритму прямого трасування зубів». Для цього введені поняття «передавальне відношення фреза – заготівля (i_{01})» та «квант переміщення фрези в результаті головного руху різання, рухів обкату та подачі ($\Delta\varphi_0$)» (19)

$$\begin{cases} i_{01} = -\text{sign}(\gamma_{m0}) \left[\frac{z_1}{n_{z0}} - \frac{S_{o2}}{2 \times \pi \times R \times \text{tg}(\gamma_{R0})} \right] \times \left[1 - \text{sign}(\gamma_{m0}) \times \frac{S_{o1} \sin(\beta)}{z_1 \times \pi \times m} \right], \\ \Delta\varphi_0 = -\frac{2\pi}{n_{hob}}, \Delta\varphi_Z = \frac{\Delta\varphi_0}{i_{01}}, \Delta S_{o1} = S_{o1} \left| \frac{\Delta\varphi_Z}{2\pi} \right|, \Delta S_{o2} = S_{o2} \left| \frac{\Delta\varphi_Z}{2\pi} \right|, \Delta S_{o3} = S_{o3} \left| \frac{\Delta\varphi_Z}{2\pi} \right|. \end{cases} \quad (19)$$

де m – модуль;

i_{01} – передатне відношення "фреза-заготівля";

Z_1 – число зубів колеса;

n_{z0} – число заходів фрези;

R – радіус, на якому розташовані центри примітивів (у окремому випадку $R = dm_0/2$, dm_0 – середній

розрахунковий діаметр фрези);

– кут підйому витків фрези на циліндрі радіуса R;

β – кут нахилу зубів колеса;

S01 – подача фрези у напрямку осі заготовки (зустрічна/попутна);

S02 – осьова подача фрези;

S03 – радіальне подання;

phob – число «тактів моделювання» на оборот фрези.

Кванти переміщень $\Delta\varphi_0, \Delta\varphi_z, \Delta S_{01}, \Delta S_{02}, \Delta S_{03}$ надалі використовуються для визначення положень зубів фрези в СК, пов'язаної із заготівлею, на будь-якому такті моделювання q.

Метод оцінки миттєвого стану процесу обробки заснований на відновленні форми поверхні, що обробляється кожним із зубів фрези в кожний момент часу. Для відновлення форми оброблюваної поверхні використовуються функціональні залежності (ФЗ), що визначають «траєкторії зворотного трасування» зубів – гладкі просторові криві, за якими зубці, що формували оброблювану поверхню («kz – минулі» зуби), наближалися до того положення, яке вони зайняли на аналізованому такті моделювання.

ФЗ зворотного трасування є векторними функціями виду $G_z^r(i, j, q, k_z, \tau)$, моделювання q, де – вектор координат центру kz – минулого примітиву в СК XZYZZZ, q – індекс такту моделювання, τ – «глибина зворотного трасування».

Для вибору єдиного положення кожного з kz – минулих примітивів, що представляють поверхню, що обробляється, використовується критерій мінімізації евклідової метрики (6.20) як функції глибини трасування τ .

$$R(i, j, q, k_z, \tau) = G_z(i, j, q, 0) G_z^r(i, j, q, k_z, \tau) \quad (20)$$

де $G_z(i, j, q, 0)$ – вектор координат в СК XZYZZZ центру примітиву, що розглядається, на такті моделювання q;

Tk – траєкторія зворотного трасування центру примітиву kz – зуба, що пройшов.

Застосування такого підходу дозволяє побудувати операційне визначення зрізаного шару фрези, що розглядається зубом, на заданому такті моделювання q, у формі геометричного відношення, заданого на аналізованих «оттрасованих» примітивах.

$$[S_{i,j}]_q = D_{a1} \cap \left[[P_{i,j}]_q - [P_{i,j}]_q \cap \left[\bigcup_{k_z=1}^{k_{z0}} [T_{i-k_z,j}]_q \right] \right], \quad (21)$$

де T – оператор зворотного трасування минулого примітиву;

Kz0 – цикл схеми різання;

Da1 – фігура, утворена розсіченням тіла заготовки площиною примітиву.

Тобто. ф-ла (15) – оцінка миттєвої площі шару, що зрізає будь-яким зубом фрези на заданому такті моделювання q. Для реалізації методу розрахунку (21), використовуються такі алгоритми:

1. Алгоритм визначення глибини зворотного трасування τ , що доставляє мінімум функції $R(i, j, q, k_z, \tau)$.

2. «Алгоритм відсікання», який використовується для виділення та видалення ділянок примітивів, що знаходяться поза тілом заготівлі.

3. Алгоритм переведення оттрасированного примітиву в систему координат примітиву.

4. Алгоритм побудови перетину та об'єднання плоских фігур, заданих списками точок.

5. Алгоритм визначення площі плоскої фігури.

Метод, заснований на використанні ФЗ зворотного трасування, дозволяє також відновлювати форму поверхні, обробленої на звороті заготовки, що передував переходу, що розглядається. Всі розроблені алгоритми об'єднані в загальному алгоритмі зворотного трасування зубів і можуть використовуватися також (крім алгоритму визначення площі) для визначення інших (крім миттєвої площі шару, що зрізається) миттєвих геометричних параметрів процесу обробки (a1, τ , \square).

Імітаційна математична модель (ИММ) процесу обробки є комплексом формальних методів і реалізують їх алгоритмів. ИММ дозволяє з будь-яким ступенем деталізації аналізувати процес обробки з погляду його геометричних закономірностей.

Вимушені коливання пружного переміщення Y по нормалі до поверхні різання, що викликаються дією впливів f(t), що обурюють, призводять до похибки обробки. Система управління за результатами вимірювання Y за допомогою виконавчого пристрою змінює товщину шару, що зрізається (шляхом зміни подачі) на величину Yi. Передавальні функції елементів пружної системи з керуючого Wyu(p) та обурюючого Wfu(p) впливу процесу формоутворення Wp(p) та виконавчого пристрою Wu(p) мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} W_y^y(p) &= Y_y^y(p) / P_y(p) = k_y / (T_{2y}p^2 + T_{1y}p + I); \\ W_y^f(p) &= Y_y^f(p) / f(p) = k_f / (T_{2y}p^2 + T_{1y}p + I); \\ W_p(p) &= P_y(p) / \delta(p) = k_p / (T_p p + I); \\ W_u(p) &= Y_y(p) / \varepsilon(p) = k_u / (T_y p + I); \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

де $\varepsilon(p) = Y^0(p) - Y(p)$; $Y^0(p)$, $Y(p)$, $P_y(p)$, $f(p)$ – операторні зображення помилки, керуючого впливу, регульованого параметра, що становить сили різання та впливу, що обурює; $k_f = k_{1y}/c_u$ – коефіцієнт передачі пружної системи з обурення; T_i і k_i – постійна часу та коефіцієнт передачі виконавчого пристрою. Інші параметри вказані у роз'ясненнях до залежностей (7), (8).

Точність роботи системи управління характеризується помилкою $\varepsilon = \varepsilon_y 0 + \varepsilon_f$, причому $\varepsilon_y 0$ – помилка, спричинена керуючим впливом $Y(t)$; ε_f – помилка, спричинена обуренням

$$\left. \begin{aligned} f(t) & \\ \varepsilon_y^0(p) &= [I + W_p(p) W_y^y(p)] Y^0(p) / [I + W_p(p) W_y^y(p) + \\ &+ W_p(p) W_y^y(p) W_u(p)]; \\ \varepsilon_f(p) &= W_y^f(p) f(p) / [I + W_p(p) W_y^f(p) + W_p(p) W_y^y(p) W_u(p)]. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

З урахуванням виразів (24) система рівнянь (22) набуває вигляду

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_y^0(p) &= (b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0) Y^0(p) / (d_4 p^4 + d_3 p^3 + \\ &+ d_2 p^2 + d_1 p + d_0); \\ \varepsilon_f(p) &= (c_2 p^2 + c_1 p + c_0) f(p) / (d_4 p^4 + d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0); \\ d_0 &= I + k_p k_y + k_u k_p k_y; \quad b_0 = I + k_p k_y; \quad d_1 = b_1 = T_4 + T_p + T_{1y} \\ d_2 &= b_2 = T_p T_u + T_{1y} + T_{2y}; \quad d_3 = b_3 = T_p T_{1y} + T_{2y} T_u \\ d_4 &= b_4 = T_p T_{2y} T_u; \quad c_0 = k_f (T_p + T_u); \quad c_2 = k_f T_p T_u. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Значення помилок, що встановилися, представляється у вигляді спадного ряду

$$\begin{aligned} \varepsilon_{y0}(t) &= g_0 Y(t) + g_1 \frac{dY(t)}{dt} + \frac{g_2}{2!} \frac{d^2 Y(t)}{dt^2} + \dots; \\ \varepsilon_{y0}(t) &= h_0 f(t) + h_1 \frac{df(t)}{dt} + \frac{h_2}{2!} \frac{d^2 f(t)}{dt^2} + \dots; \end{aligned}$$

де g_0, g_1, g_2, \dots ; h_0, h_1, h_2, \dots – коефіцієнти помилок, що характеризують точність роботи системи та залежні від її структури. У структурі системи управління (рис. 2 а) значення коефіцієнтів помилок визначаються співвідношеннями

$$\left. \begin{aligned} n_0 &= u_0 \cdot \varepsilon_0 \quad n_1 = (u_1 - \varepsilon_1 n_0) \cdot \varepsilon_0 \quad n_2 \cdot 2 = (u_2 - \varepsilon_2 n_1 - \varepsilon_1 n_0) \cdot \varepsilon_0 \dots \\ h_0 &= c_0 / d_0; \quad h_1 = (c_1 - d_1 h_0) / d_0; \quad h_2 / 2 = (c_2 - d_2 h_1 - d_1 h_0) / d_0 \dots \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Для зубофрезерних верстатів підвищеної точності основну похибку становлять коефіцієнти статичних та кінематичних помилок g_0, h_0 та g_1, h_1 . Усунення цих помилок дозволить суттєво підвищити один із основних параметрів експлуатаційної характеристики системи – технологічні параметри зубофрезерування при забезпеченні заданої точності з максимально досяжною продуктивністю.

Для вирішення поставленої задачі введемо в систему управління пружними переміщеннями ДТСС додатковий позитивний зворотний зв'язок за складовою P_u сили різання з передатною функцією W_{oc}^u . У цьому випадку

помилка ε_{y0} щодо управління Y^0 .

$$\varepsilon_{y0}(p) = \frac{[1 - W_p(p)W_y(p)W_{oc}^y(p) + W_c^y(p)W_p(p)]Y^0(p)}{1 - W_p(p)W_y(p)W_{oc}^y(p) + W_p(p)W_y^s(p) + W_y^y(p)W_p(p)W_u(p)} \quad (26)$$

Прирівнявши чисельник виразу (26) до нуля, визначимо структуру та параметри передавальної функції W_{oc}^y , при яких усувається помилка $\varepsilon_{y0}(p)$:

$$W_{oc}^y(p) = [1 + W_y^y(p)W_p(p)] / [W_p(p)W_u(p)]. \quad (27)$$

Вираз (27) є умовою повної інваріантності системи управління з керуючого впливу $Y^0(t)$, і за його виконання коефіцієнти g_i (де $i = 1, 2, 3, \dots$) дорівнюють нулю. Проте виконання умови (27), як правило, призводить до фізично нереалізованих систем. У той самий час достатня практики точність обробки досягається при $g_0=0$ і $g_1=0$. Для цього достатньо, щоб $b_0=0$ і $b_1=0$. Однак при $b_1=0$ та $d_1=0$, що призводить до втрати стійкості технологічної системи. Тому для класу систем, що розглядається, досить усунути кінематичну помилку $g_0=b_0/d_0=0$. Останнє досягається введенням позитивного зворотного зв'язку за силою різання P_y з функцією передавальної $W_{yo.c}(p)=k_{o.c}$. При цьому $b_0=1+k_p k_y - k_p k_u k_{o.c}$.

$$k_{o.c} = (1 + k_p k_y) / (k_p k_u). \quad (28)$$

Визначимо помилку, що вноситься збурюючими впливами $f(p)$, з урахуванням $W_{oc}^y(p)$:

$$\varepsilon_f(p) = \frac{W_y^y(p)[1 - W_p(p)W_y(p)W_{oc}^f(p)]/W(p)}{1 - W_p(p)W_u(p)W_{oc}^f(p) + W_y^f(p)W_p(p)W_u(p) + W_y^y(p)W_p(p)} \quad (29)$$

Прирівнявши чисельник виразу (29) нулю, знайдемо умову повної інваріантності по

□ $f(t)$:

$$W_{oc}^f(p) = 1 / [W_p(p)W_u(p)] = (T_p p + 1) / (k_p k_u). \quad (30)$$

Умова (30) виконується, якщо структура передавальної функції зворотного зв'язку визначається виразом $W_{oc}^f(p) = k_{o.c} + T_{oc} k_p k_u$, а параметри вибираються з умов $c_0=1-k_p k_u k_{o.c}=0$, $c_1= T_0+T_i-T_{pp} =0$, причому $k_{o.c}=1/k_u k_{o.c}$; $T_{oc}=(T_p + T_u)/(k_p k_u)$.

Технічна реалізація позитивного зворотного зв'язку за силою різання P_y (P_z, P_x), що компенсує вплив кінематичних помилок, представлена на рис. 3, б. Як чутливі і перетворюючі елементи 1 використовуються системи електронного адаптивного управління з датчиками зворотного зв'язку.

Блок 2 дозволяє компенсувати вплив температури і коливання напруги живлення. Вихідний сигнал підсилювача УРУ надходить на вхід диференціюючого ланцюга 4 і дільник управління технологічної системи 3. При зміні сигналу ланцюга 4 регулюється значення T_0c , а в ланцюгу 3 – k_0c . Сигнали $U_2=f(T_{ocp})$ та $U_1=f(k_0c)$ сумуються на вході суматора.

Отримані залежності (1) – (3), (10), (12), (15) – (22) та побудовані в координатах t, S, v області оптимальних технологічних параметрів зубофрезерування дозволяють перейти до алгоритмізації оптимального управління технологічних процесів зубообробки з розробкою системи технологічного оптимального управління, що реалізують такі алгоритми [1, 4].

Висновки. Розглянуто новий підхід до прогнозування похибок механічної обробки зубчастих коліс, що базується на принципах суперпозиції, векторному характері складових похибки та методі статистичного математичного моделювання методом Монте – Карло.

Відмінністю реального формоутворення від номінального (ідеального) є відхилення геометрії реальних профілів від номінальних. Основними кінцевими завданнями, які мають бути вирішені при дослідженні закономірностей реального формоутворення, є завдання прогнозування із заданою достовірністю похибок, що виникають.

Аналіз механізмів формування похибок зубчастих коліс свідчить про те, що елементарні похибки технологічних систем операцій зубообробки характеризуються випадковими числовими характеристиками, що визначають величину і характер входження у відповідні комплексні складові, які, своєю чергою, взаємодіючи між собою, визначають досліджувані похибки зубчастих коліс.

Проведений аналіз апріорних уявлень про об'єкт моделювання дозволив виділити найбільш значущі інформативні параметри процесу зубообробки з урахуванням динамічних параметрів та значною мірою

обумовлюється зміною в часі геометричних та кінематичних характеристик для всіх точок периметра ріжучих кромок усіх працюючих зубів черв'ячної фрези.

Список літератури

1. Технологические способы повышения точности зубофрезерования универсальными червячными фрезами / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, В. Ф. Шаповалов, О. Е. Мироненко // – Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ ХПІ, 2010. – № 25. – С. 134–141.
2. Технологические особенности обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес [Текст] / Н.В. Кравцов, Ю.В. Тимофеев, А.А.Ключко [и др.]; Науч. Ред.: А.А.Пермяков; ВолГТУ – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 254 с., ил., табл.; - (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / общ. ред. Ю.М. Соломенцев), ISBN 978-59903090-6-7.
3. Ключко А. А. Технология чистовой лезвийной обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес / А. А. Ключко // – Вестник Черниг. гос. технолог. ун-та. – 2011. – № 2(49). – С. 58–68.
4. Шелковой А. Имитационное моделирование в задачах механосборочного производства /А. Шелковой, А. Ключко, Е. Набока // – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 528 с.: ил. На русском языке. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN:9783659691720
5. Рябченко С.В. Профільне шліфування зубчастих коліс редукторів очисних комбайнів/ С.В. Рябченко, О.М.Ковальчук, В.В. Нежебовський, Р.А. Бережний, О.О. Шилков, О.О. Ключко// Інструментальне матеріалознавство: Збірник наукових праць. – Вип.24. – Київ: ІНМ ім.В.М. Бакуля НАН України. 2021. – С. 464-470.
6. Охріменко О.А., Ключко О.О., Гасанов М.И., Заковоротний О.Ю., Рябченко С.В. Проектування червячних фрез для зубчастих коліс з припуском під зубшліфування. Інформатика, управління та штучний інтелект. Тези восьмої міжнародної науково-технічної конференції. – Харків: НТУ "ХПІ", 2021. – С. 102 – 104.
7. Пермяков О.А., Ключко О.О., Камчатна-Степанова К.В., Новіков Ф.В. Червячна фреза з роздільною схемою формування з поворотними непереточуваними різальними елементами. Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы международной научно-технической конференции, 22-24 сентября 2021 г., г. Одесса. – Одесса: Государственный университет «Одесская политехника», 2021. – С. 133 – 134.
8. Особливості побудови алгоритмів метода групового врахування аргументів. Ключко О.О., Корбут Є.В., Равська Н.С., Родін Р.П., Парненко В.С. Збірник наукових праць XI Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 5–6 листопада 2021 року. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. – С. 137–139.
9. Пермяков О.А., Ключко О.О., Камчатная-Степанова О.В., Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Сапон С.П. Моделювання технологічних процесів оброблення великомодульних зубчастих коліс. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2021) : матеріали тез доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 26–27 травня 2021 р.) : у 2 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.] ; відп. за вип.: Єрошенко Андрій Михайлович [та ін.]. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – Т. 1. – С. 73 – 74.
10. Kamchatna – Stepanova K. Methodology for the development of a model for managing the quality and productivity of shaping when processing hardened coarse-modular gears. / V. Kovalov , Y. Vasylychenko, M. Shapovalov, O. Antsyferova, K. Kamchatna - Stepanova // Інформатика, управління та штучний інтелект. Тези сьомої міжнародної науково-технічної конференції (17 – 19 листопада 2020 р.). Харків – Краматорськ – Харків, НТУ «ХПІ», 2020. С. 36 - 38.

References (transliterated):

1. 1. Tekhnologicheskie sposoby` pov`sheniya tochnosti zubofrezirovaniya universal`ny`mi chervyachny`mi frezami / Yu. V. Timofeev, E. V. Mironenko, A. A. Klochko, V. F. Shapovalov, O. E. Mironenko // – Vi`snik Naczi`onal`nogo tekhnichnogo uni`versitetu «Kharki`vs`kij poli`tekhnichni`y`nstitut» – Kharki`v: NTU KhPI, 2010. – # 25. – S. 134–141.
2. . Tekhnologicheskie osobennosti obrabotki krupnomodul`ny`kh zakalenny`kh zubchaty`kh koles [Tekst] / N.V. Kravcov, Yu.V. Timofeev, A.A.Klochko [i dr.]; Nauch. Red.: A.A.Permyakov; VolGTU – Tol`yatti: ZAO «ONIKS», 2012 – 254 s., il., tabl.; - (Seriya: Upravlenie kachestvom tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii / obshh. red. Yu.M. Solomenczev), ISBN 978-59903090-6-7.
3. Klochko A. A. Tekhnologiya chistovoj lezviynoj obrabotki krupnomodul`ny`kh zakalenny`kh zubchaty`kh koles / A. A. Klochko // – Vestnik Chernig. gos. tekhnolog. un-ta. – 2011. – # 2(49). – S. 58–68.
4. Shelkovej A. Imitacionnoe modelirovaniye v zadachakh mekhanosborochnoho proizvodstva /A. Shelkovej, A. Klochko, E. Naboka // – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 528 s.: il. Na russkom yazy`ke. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN:9783659691720
5. Ryabchenko S.V. Profi`l`ne shli`fuvannya zubchastikh koli`s reduktori`v ochisnikh kombajni`v/ S.V. Ryabchenko, O.M.Koval`chuk, V.V. Nezhebovs`kij, R.A. Berezhnij, O.O. Shilkov, O.O. Klochko// I`nstrumental`ne materi`aloznavstvo: Zbi`rnik naukovikh prac`v. – Vip.24. – Kiyiv: I`NM i`m.V.M. Bakulya NAN Ukrayini. 2021. – S. 464-470.
6. Okhri`menko O.A., Klochko O.O., Gasanov M.I., Zakovorotnij O.Yu., Ryabchenko S.V. Proektuvannya chervyachnikh frez dlya zubchastikh koli`s z pripuskom pi`d zubshli`fuvannya. I`nformatika, upravli`nnya ta shtuchnij i`ntelekt. Tezi vos`moyi mi`zhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferenczi`yi. – Kharki`v: NTU "KhPI", 2021. – S. 102 – 104.
7. Permyakov O.A., Klochko O.O., Kamchatna-Stepanova K.V., Novi`kov F.V. Chervyachna freza z rozdi`l`noyu skhemoyu formoutvorenniya z povorotnimi neperetochuvanimi ri`zal`nimi elementami. Novy`e i`netradiczi`onny`e tekhnologii v resurso- i`energoberezhennii: Materialy` mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferenczii, 22-24 sentyabrya 2021 g., g. Odessa. – Odessa: Gosudarstvenny`j universitet «Odesskaya politehnika», 2021. – S. 133 – 134.
8. Osoblivosti` pobudovi algoritmi`v metoda grupovogo vrakhuvannya argumenti`v. Klochko O.O., Korbut Ye.V., Rav`ska N.S., Rodi`n R.P., Parnenko V.S. Zbi`rnik naukovikh prac`v` KhI` Vseukrayins`koyi naukovo-tekhnichnoyi konferenczi`yi z mi`zhnarodnoyu uchastyu «Proczi`si mekhanichnoyi obrobki, verstaty ta i`nstrument», 5–6 listopada 2021 roku. – Zhitomir : Derzhavnij uni`versitet «Zhitomir`ska poli`tekhnika», 2021. – S. 137–139.
9. . Permyakov O.A., Klochko O.O., Kamchatnaya-Stepanova O.V., Koval`ov V.D., Vasi`lchenko Ya.V., Sapon S.P. Modelyuvannya tekhnologi`chnikh procesi`v obroblyennya velikomodul`nikh zubchastikh koli`s. Kompleksne zabezpechennya yakosti` tekhnologi`chnikh procesi`v ta sistem (KZYATPS – 2021) : materi`ali tez dopovi`dej XI Mi`zhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferenczi`yi (m. Cherni`gi`v, 26–27 travnya 2021 r.) : u 2 t. / Naczi`onal`nij uni`versitet «Cherni`gi`vs`ka poli`tekhnika» [ta i`n.]; vi`dp. za vip.: Yeroshenko Andri`j Mikhajlovich [ta i`n.]. – Cherni`gi`v : NU «Cherni`gi`vs`ka poli`tekhnika», 2021. – T. 1. – S. 73 – 74.
10. Kamchatna – Stepanova K. Methodology for the development of a model for managing the quality and productivity of shaping when processing hardened coarse-modular gears. / V. Kovalov , Y. Vasylychenko, M. Shapovalov, O. Antsyferova, K. Kamchatna - Stepanova // I`nformatika,

Відомості про авторів / About the Authors

Мироненко Євген Васильович (Мироненко Евгений Васильевич, Mironenko Evgeny Vasilyevich) – декан, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (050)-604-4967; e-mail: evgeny.mironenko@dgma.donetsk.ua;

Ковальов Віктор Дмитрієвич (Ковалев Виктор Дмитриевич, Kovalev Victor Dmitrievich) – ректор, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (095)-398-9725; e-mail: kovalov.viktor@gmail.com;

Васильченко Яна Василівна (Васильченко Яна Васильевна, Vasilchenko Yana Vasilievna) – завід. кафедри, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (050)-814-7730; e-mail: vasilchenko.ua@gmail.com;

Клименко Галина Пнєтрівна (Vasilchenko Yana Vasilievna) – доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (050)-2198511 ;

Фадєєв Валерій Андрійович (Fadeev Valeriy) – доктор технічних наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Національного Технічного Університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: 380503236418, e-mail fadeev@fed.com.ua;

Шаповалов Максим Валерійович (Шаповалов Максим Валерьевич, Sharovalov Maxim Valerevich) – кандидат технічних наук, кафедра комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (066)-336-0808; e-mail: mntk.ddma@gmail.com