

УДК 621.923

Петраков Ю.В., Шуплецов Д.К.*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»***ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОРЕКЦІЇ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРИ КОНТУРНОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ**

Запропонований метод проектування скорегованої траєкторії формоутворення контуру деталі на верстаті з ЧПК, заснований на імітаційному моделюванні процесу циліндричного фрезерування в пружній технологічній обробляючій системі з використанням натурних даних вимірювань контуру, що був оброблений на першому проході та розробленої математичної моделі силових і пружних характеристик процесу.

Ключові слова: імітаційне моделювання, корекція траєкторії формоутворення, циліндричне фрезерування.

Петраков Ю.В., Шуплецов Д.К.**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРЕКЦИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ КОНТУРНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ**

Предложен метод проектирования скорректированной траектории формообразования контура детали на станке с ЧПУ, основанный на имитационном моделировании процесса цилиндрического фрезерования в упругой технологической обрабатывающей системе с использованием натуральных данных измерений контура, который был обработан на первом проходе и разработанных математических моделей силовых и упругих характеристик процесса.

Ключевые слова: имитационное моделирование, коррекция траектории формообразования, цилиндрическое фрезерование.

Petrakov Y.V., Shuplevcov D.K.**IMITATION SIMULATION OF FORMING CORRECTION FOR CONTOUR MILLING**

Proposed design method the adjusted trajectory formation contour parts on the CNC machine, based on a simulation model of the process of milling cylindrical in elastic technological machining system using field measurement data of a contour that was processed during the first pass and the mathematical models for force and elastic characteristics of the process.

Keywords: imitation design, correction of trajectory of forming, cylindrical milling.

Вступ. Процес різання завжди відбувається в пружній технологічній обробляючій системі (ТОС), є замкненим і квазістаціонарним. Замкненість процесу різання в ТОС пояснюється наявністю впливу деформації, викликаної силою різання, на параметри шару припуску, який зрізується, що, в свою чергу, провокує зміну сили різання і так далі. Квазістаціонарність обумовлюється постійними змінами головних збурень, що діють на процес, зміною жорсткості ТОС при переміщенні вузлів верстату за формоутворюючою траєкторією тощо. Тому при обробці складних поверхонь деталей машин, завжди викликає проблема забезпечення необхідної точності форми, яка часто вирішується призначенням додаткових проходів, хоча такий метод може давати позитивний результат тільки при розташуванні похибки в «плюс».

Відомі методи налагодження процесу оброблення різанням з використанням так званих «пробних проходів» [1, 2]. Проте, як показує аналіз, такі методи найчастіше застосовуються для визначення оброблюваності матеріалів, режиму різання і тільки в найпростіших випадках (токальне оброблення циліндричних поверхонь) для корекції положення інструменту за результатами вимірів на пробному проході. Корекція управляючих програм для оброблення складних поверхонь, розглядається з метою усунення колізій, що виникають в особливих місцях формоутворення, пов'язаних з формуванням гострих кутів профілю, різкою зміною напрямку руху [3, 4].

Відомі методи управління точністю оброблення за апостеріорною інформацією, коли корекція траєкторії формоутворення на наступній деталі розраховується за результатами вимірювань попередньо обробленої деталі [5]. Ясно, що забезпечення необхідної точності оброблення складних поверхонь унікальних виробів, які виготовляються в одиничному виробництві, не може бути досягнене таким методом і наразі залишається актуальною науково-технічною проблемою.

Мета роботи. Розробити спосіб корекції формоутворюючої траєкторії та відповідну методику, втілену у програмному забезпеченні, яка спроможна в автоматичному режимі виконати розрахунки скорегованої формоутворюючої траєкторії на останньому проході за результатами вимірів поверхні на попередньому проході.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Забезпечити вимірювання обробленої поверхні деталі в автоматичному режимі, безпосередньо на верстаті з ЧПК.
2. Розробити математичну модель утворення похибки внаслідок пружних деформацій ТОС при різанні, зокрема, при циліндричному контурному фрезеруванні.
3. Розробити математичну модель розрахунку скорегованої за результатами вимірів управляючої програми для виконання останнього проходу.

Основна частина. Для досягнення мети роботи в основу була покладена гіпотеза, яка, до речі, знайшла підтвердження в попередніх експериментах, виконаних на кафедрі Технології машинобудування НТУУ «КПІ» [6]. Гіпотеза полягає в припущенні, що вся необхідна для проектування скорегованої управляючої програми інформація (жорсткості ТОС за відповідними осями координат, параметри і характеристики процесу різання тощо) міститься у вимірах поверхні деталі, обробленої на попередньому проході. Також був запропонований метод визначення необхідної інформації за такими вимірами і метод проектування скорегованої траєкторії, що базується на імітаційному моделюванні процесу оброблення.

Таким чином, необхідною умовою використання методу є оброблення поверхні деталі мінімум за два проходи.

Для вирішення першої задачі вимірювань обробленої поверхні безпосередньо на верстаті з ЧПК з формуванням необхідного для подальшого застосування формату файлу можна використовувати модуль PowerINSPECT OMV [7]. Проте для апробації запропонованої методики на першому етапі було вирішено виконувати вимірювання безпосередньо на верстаті з ЧПК три координатним щупом при рухах за спеціальною управляючою програмою. Така управляюча програма має бути підготовлена з перерахунку масиву траєкторії, що представляє еквідистанту центру фрези до контуру деталі в траєкторію, яка є еквідистантою центру кульки вимірювального щупа.

Для вирішення другої задачі розроблення математичної моделі утворення похибки від пружних деформацій в процесі контурного фрезерування можна скористатися схемою за рис.1, де показане фрезерування довільного контуру. В процесі моделювання необхідно визначити головну характеристику процесу різання – швидкість видалення припуску (MRR – Material Removal Rate [8]) і складові сили різання, що діють за відповідними осями координат.

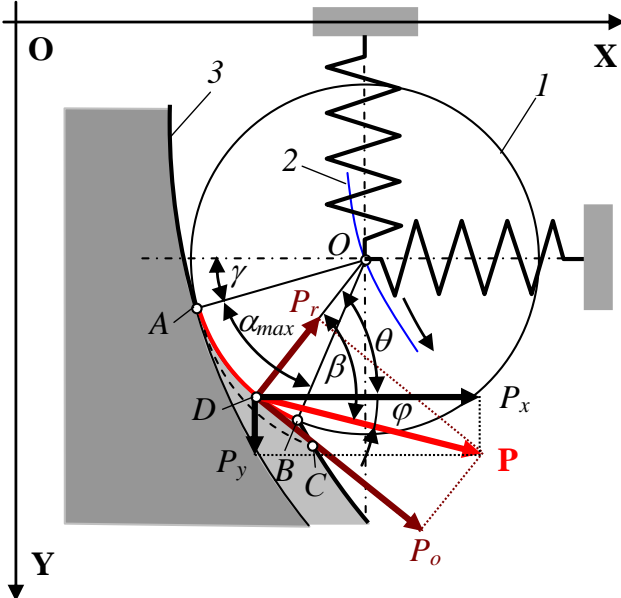


Рис.1. Схема фрезерування контуру

При контурному фрезеруванні побудова моделі процесу різання проводиться у відповідності до загальних принципів, що впливають з аналізу замкненої ТОС [5]. На схемі показане положення фрези 1 з центром у точці O при русі за геометричною (теоретичною) еквідистантою 2 до оброблюваного контуру 3 деталі. Пунктирною лінією позначена траєкторія зубу фрези при переміщенні за еквідистантою на величину подачі на зуб, а площа поперечного перетину припуску, що при цьому зрізується, показана фігурою ABC . На підставі чисельного моделювання процесу фрезерування, який представлений у роботі [9], можна вважати, що вектор \mathbf{P} сили різання прикладений в точці D , яка знаходиться за кутом $2\alpha/3$ (де α – кут дуги різання) від кута γ нахилу нормалі до контуру в точці A формоутворення контуру.

Для визначення дуги різання використовується алгоритм, блок-схема якого представлена в роботі [9]. Оскільки моделювання виконується чисельними методами, контур заготовки і траєкторія еквідистанти мають бути представлені цифровими масивами $[x_s]_i, [y_s]_i$ і $[x_e]_j, [y_e]_j$ відповідно для чого застосовується спеціальна процедура перетворення з заданим кроком [5, 9].

Для поставленої задачі необхідно визначити максимальну величину окружної складової сили різання. Отже, зуб фрези рухається за поверхнею різання, яка у перетині, перпендикулярному

вісі фрези, представляється дугою (початок у точці A , кінець у точці C – дивись рис.1), яка визначається центральним кутом α_{max} різання:

$$\alpha_{max} = \arccos\left(1 - \frac{H}{R_\phi}\right), \quad (1)$$

де H – глибина різання (товщина шару припуску, що зрізується), R_ϕ – радіус фрези.

Поточна товщина шару, що зрізується, може бути знайдена з геометричних співвідношень трикутника ACB . Якщо, з деяким наближенням, вважати ΔACB прямокутним, а $\angle BAC \approx \alpha$, то товщина a шару, що зрізується, дорівнює:

$$a = S_z \sin \alpha, \quad (2)$$

де S_z – подача на зуб фрези.

Таким чином, максимальна величина окружної складової сили різання може бути визначена за наступною залежністю:

$$P_o = C_p \cdot B \cdot S_z^{1-k} \sin^{1-k} \alpha_{max}, \quad (3)$$

де C_p , k – емпіричні коефіцієнт і показник ступеня, величини яких визначаються за таблицею 1 [10].

Таблиця 1

Дані для визначення окружної складової сили різання

	Матеріал заготовки	C_p	k
1	Сталь 20Х	1200	0,36
2	Сталь 40	1350	0,29
3	Сталь 40Х	1550	0,28
4	Чавун НВ100	440	0,40
5	Чавун НВ170	690	0,34
6	Чавун НВ195	770	0,33
7	Алюміній Ал9	250	0,52

Враховуючи, що при циліндричному фрезеруванні радіальна складова $P_r = 0,4P_o$, маємо:

$$P = \sqrt{P_r^2 + P_o^2} = P_r \sqrt{1,4}. \quad (4)$$

Складові P_x і P_y сили різання можна визначити за залежностями, що впливають з геометричних співвідношень рис.1:

$$P_y = P \sin \varphi, \quad P_x = P \cos \varphi, \quad (5)$$

де $\varphi = \beta - \theta = \arctan(2,5) - \gamma - 2\alpha/3$, де γ – кут нахилу нормалі до контуру в точці A формоутворення.

Таким чином, при моделюванні оброблення контуру автоматично створюються цифрові масиви $[P_x]$ і $[P_y]$ відповідних складових сили різання. Після цього, використовуючи цифрові масиви складових $[\delta_x]$ і $[\delta_y]$ похибки, що виникла на першому проході і була виміряна, розраховуються цифрові масиви $[C_x]$ і $[C_y]$ жорсткості за відповідними осями координат:

$$[C_x] = [\delta_x] / [P_x], \quad [C_y] = [\delta_y] / [P_y], \quad (6)$$

де $[P_x]$ і $[P_y]$ – цифрові масиви відповідних складових сили різання, що були визначені на етапі моделювання процесу фрезерування.

Далі виконується моделювання зрізування припуску на другому проході і за його результатами визначається скорегована траєкторія, що усуває похибку від пружних деформацій ТОС.

Послідовність алгоритму включає в себе 2 етапи, 1-й етап – це оброблення деталі на верстаті та її вимірювання, 2-й етап – виконання корекції управляючої програми у програмному забезпеченні, що включає в себе імітаційне моделювання оброблення на 1-му проході, розрахунок цифрових масивів складових сил різання за наведеною вище методикою та цифрових масивів жорсткостей, імітаційне моделювання зрізування припуску на 2-му проході, та корекція траєкторії

на 2-му проході. Результатом роботи програми є G – код, що вже є скорегованим для виконання 2-го проходу на верстаті з ЧПК.

Для проведення попередніх експериментів з реалізації запропонованого методу була розроблена прикладна програма «Моделювання зрізування припуску при контурному фрезеруванні», інтерфейс якої в стані моделювання зрізування припуску на першому проході заготовки представлений на рис.2. Зліва інтерфейсу розташовані віконця для завдання вихідних параметрів процесу фрезерування та ТОС, справа вікно анімації процесу моделювання, знизу – віртуальний осцилограф для відображення зміни характеристик процесу у часі, прив'язаному до довжини еквідистанти, під осцилографом – розташоване вікно для вибору матеріалу заготовки та кнопки управління.

При натисканні кнопки «Процес» відбувається моделювання фрезерування припуску у відповідності до вихідних даних, а в графічному вікні і вікні віртуального осцилографа виконується анімація рухів, яка в точності відображає параметри системи на будь-якому кроці моделювання. Крім того, в процесі руху фрези на кожному кроці моделювання відображаються точки *A* і *B* початку і кінця дуги різання.

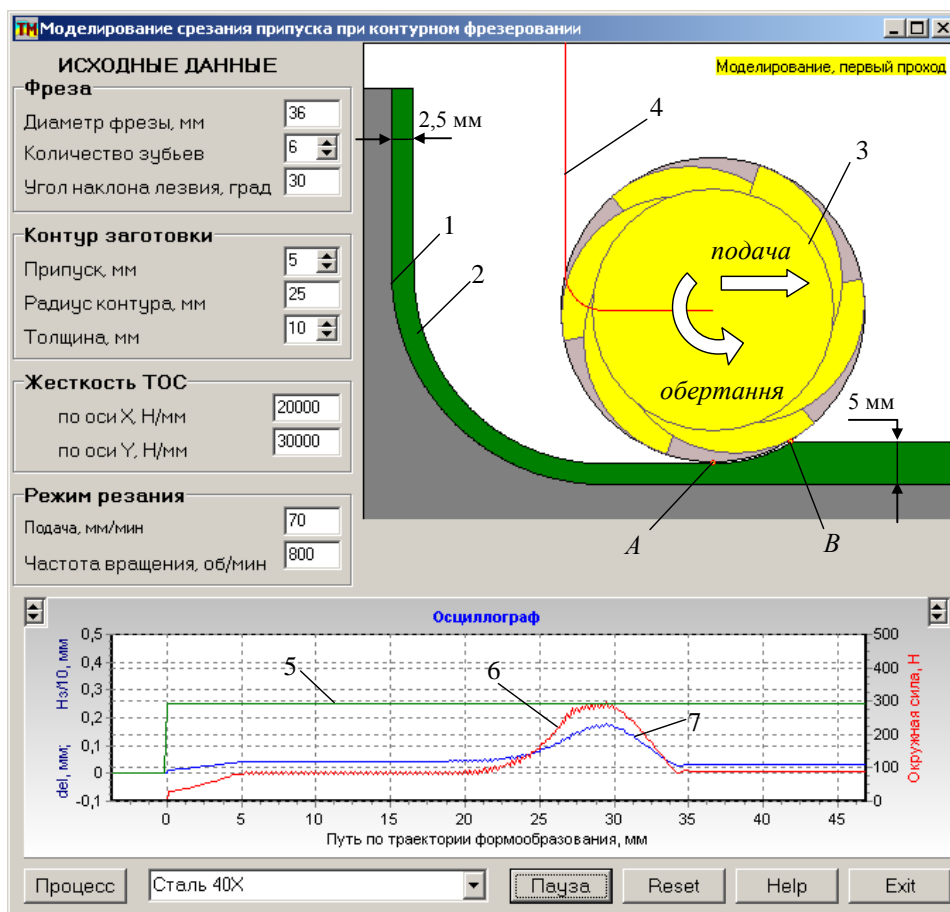


Рис.2. Інтерфейс в кінці моделювання фрезерування на першому проході

Контур деталі 1, що фрезерується, складається з двох прямих і дуги кола, а припуск 2 розташований еквідистантно на відстані 5 мм до нього. На першому проході центр фрези 3 рухається за теоретичною еквідистантою 4, а на екрані віртуального осцилографа представляються наступні графіки: лінія 5 – задана глибина різання (Hz), лінія 6 – окружна складова сили різання, лінія 7 – похибка (del) контуру від пружних деформацій, виміряна за нормаллю.

Як і очікувалось, процес є суттєво нестационарним – при постійній глибині різання за контуром окружна складова сили різання змінюється майже у 3 рази від 100Н на прямолінійних ділянках до 300Н на дузі кола. Відповідно, це провокує зміну похибки формоутворення від пружних деформацій від 0,03мм до 0,18мм. Ясно, що такий характер похибки не може бути скомпенсований ніякими коректорами, чи іншими засобами безпосередньо зі стійки ЧПК верстата.

На наступній стадії моделюється процес вимірювань контуру, що утворився. Дані вимірювань зберігаються в програмі у вигляді відповідних цифрових масивів для розрахунку

скорегованої траєкторії переміщення центру фрези на другому проході. Розрахунки виконуються у відповідності з принципом управління за апіорною інформацією через передатні функції замкненої пружної системи за координатними осями. Враховуючи істотну нелінійність моделі, ці передатні функції мають визначатися числовими методами на кожному елементарному кроку моделювання:

$$W_x = \delta_x / x_\phi, \quad W_y = \delta_y / y_\phi. \quad (7)$$

Таким чином, координати скорегованої траєкторії знаходяться за залежностями:

$$x_k = x_m (1 + W_x), \quad y_k = y_m (1 + W_y). \quad (8)$$

На наступному етапі, за розробленим алгоритмом, виконується імітаційне моделювання процесу зрізування припуску на другому проході. Необхідність такого етапу викликана тим, що основна характеристика процесу фрезерування – MRR – і, як наслідок, окружна складова сили різання, пружна деформація ТОС змінюються. Тому саме отримані на цьому етапі дані будуть використовуватись для розрахунку скорегованої траєкторії.

Нарешті, після автоматичного виконання всіх необхідних процедур, пов'язаних з розрахунками скорегованої траєкторії виконується імітаційне моделювання фрезерування з корекцією. На осцилографі (рис.3,а) представлені ті ж самі характеристики (лінія 1 – глибина різання, лінія 2 – окружна складова сили різання, лінія 3 – похибка ТОС від пружних деформацій). Для порівняння на осцилографі збережена похибка ТОС від пружних деформацій, що спостерігалася при моделюванні другого проходу без корекції формоутворюючої траєкторії – лінія 4. Отже за корекції спостерігається суттєве зниження (приблизно у 20 разів) похибки, яка була викликана пружними деформаціями ТОС.

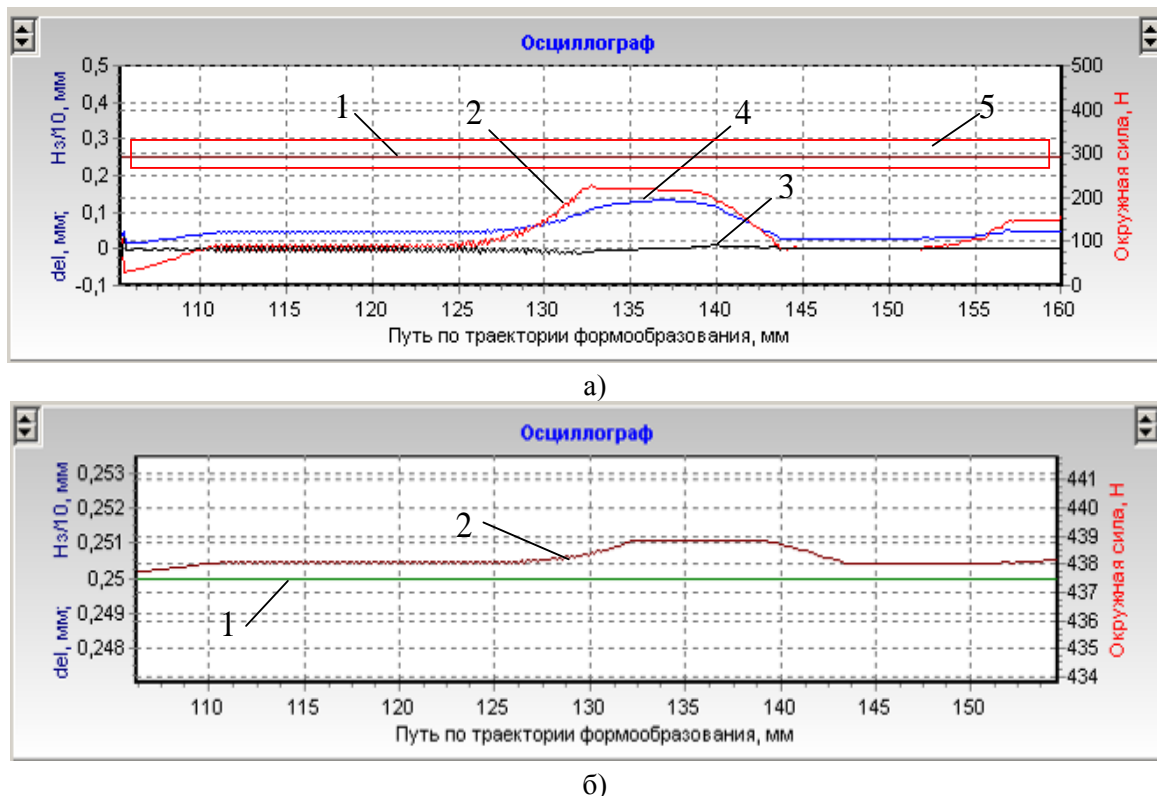


Рис.3 Інтерфейс програми в кінці моделювання з корекцією траєкторії

Така корекція відображається на зміні заданої глибини різання за формоутворюючою траєкторією на другому проході (рис.3,б), де лінією 1 позначена задана глибина різання на першому проході (2,5мм), а лінією 2 – задана глибина різання на другому проході з корекцією формоутворюючої траєкторії.

Висновки

1. Розроблена методика визначення сили різання і пружних деформацій при контурному фрезеруванні, яка ґрунтується на визначенні головної характеристики процесу різання – швидкості видалення припуску і ураховує замкненість ТОС.
2. Розроблений алгоритм забезпечення точності фрезерування контурів деталей методом управління за апостеріорною інформацією, що передбачає оброблення контуру за два проходи з вимірюванням контуру після першого проходу, моделюванням процесу фрезерування, подальшому обробленні отриманої за вимірами інформації і обробленням контуру на другому проході за автоматично спроектованим скорегованим файлом управління.
3. Моделювання переконливо продемонструвало можливість та ефективність такого управління – похибка знижена більш ніж у 20 разів. Планується проведення натурних експериментів для остаточного підтвердження отриманих результатів та створення спеціального програмного продукту для виконання корекції за результатами вимірів безпосередньо на верстаті з ЧПК.
4. Запропонована методика проектування скорегованої траєкторії може бути застосована для оброблення складних 3D форм, деталей в одиничному виробництві, коли нестационарність процесу різання і недостатня жорсткість пружної ТОС приводять до значних похибок формоутворення.

Список використаних джерел:

1. Корсаков В.С. Точность механической обработки / М., Машиностроение, 1961, 374 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя. в 2-х Т / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова - М.:Машиностроение-1, 2003, 944с.
3. Залого В.А., Криворучко Д.В., Голдун Д.Г. Методика коррекции управляющих программ для обработки методом концевго фрезерования на станках с ЧПУ / Сумы 2005, <http://zavantag.com/docs/298/index-1238809.html>.
4. Вэй Пью Маунг. Повышение эффективности контурной обработки на станках с ЧПУ путём коррекции траектории и режимов резания: диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.08 / Вэй Пью Маунг; [Место защиты: Московский государственный технологический университет "Станкин" <http://stankin.ru/science/dissertatsionnye-sovety/d-212-142-01/vey-po-maung/Диссертация.pdf>]. - Москва, 2014.- 165 с.
5. Петраков Ю.В., Драчев О.И. Автоматическое управление процессами резания / ТНТ, 2014, 408с.
6. Петраков Ю.В., Ковальчук Д.П. Повышение точности токарной обработки на станках с ЧПУ / Вісник НТУУ «КПІ», Машинобудування №68, Київ, 2013, с.134-138.
7. Веретнов А. Контроль точности обработки изделий на станках с ЧПУ при помощи PowerINSPECT OMV / ж. САПР и графика, июнь, 2012, с.76-79.
8. Tian-Syung Lan, Kuei-Shu Hsu The Implementation of Optimum MRR on Digital PC-Based Lathe System / The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, V.35, pp.248-254.
9. Петраков Ю.В., Мацківський О.С. Моделювання фрезерування кінцевими фрезами / Вісник НТУУ «КПІ», серія машинобудування, №73, Київ, 2015, С.78-83.
10. Справочник технолога-машиностроителя. в 2-х Т / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова - М.:Машиностроение-1, 2003, 944с.

Стаття надійшла до редакції 16.04.2016.