

**О.А. Литвиненко, д.т.н., проф.**

**Ю.І. Бойко, к.т.н., доц.**

*Національний університет харчових технологій*

**В.А. Яновський, доц.**

*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## **CAD-CAM технології проєктування та виготовлення деталей на верстатах з ЧПК**

*У роботі розглянуто використання CAD-CAM технологій для проєктування та виготовлення деталей на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК). Ці технології дозволяють проєктувати технологічні маршрути обробки поверхонь деталей різної складності та виготовляти їх на сучасних обробляючих центрах з ЧПК, а їх використання в умовах малосерійного, одичного виробництва виправдане та економічно раціональне.*

*На багатьох діючих підприємствах різних галузей промисловості тривалий час експлуатується технологічне обладнання, що морально та фізично застаріло. Як правило, швидкозношувані деталі (запасні частини) для нього вже не виробляються. Заміна застарілого технологічного обладнання в діючих технологічних схемах виробничого процесу підприємства потребує суттєвих матеріальних та фінансових витрат, а його ремонт ускладнюється відсутністю запасних частин. Тому актуальним є питання виготовлення на індивідуальне замовлення підприємства невеликої кількості зношених деталей для підвищення ремонтпридатності діючого технологічного обладнання.*

*Статтю присвячено дослідженню можливостей використання систем програмних комплексів CAD-CAM «Autodesk Inventor», «ESPRIT» та «Creo Parametric» для виготовлення на замовлення підприємства зношеного робочого колеса відцентрового електронасоса КМ 65-50-220, який встановлено у системі водоочищення виробничого процесу харчового підприємства.*

*Наведено поетапну послідовність проєктування і виготовлення нової вдосконаленої (модернізованої) деталі замість зношеної, можливості та переваги сучасних програмних комплексів CAD-CAM, технологічні можливості обладнання з ЧПК. Показано, що використання CAD-CAM систем «Autodesk Inventor», «Esprit» і «Creo Parametric» і сучасного обробляючого центру Haas UMC-750 з ЧПК для виготовлення нової вдосконаленої конструкції робочого колеса електронасоса в умовах одиничного виробництва дозволило значно скоротити терміни технологічної підготовки на виготовлення і заміну зношеної деталі, підвищити показники якості, безвідмовності, довговічності та ремонтпридатності діючого на підприємстві обладнання.*

**Ключові слова:** комп'ютерні технології; CAD-CAM системи; проєктування; верстат з ЧПК; виготовлення; запасні частини; траєкторія руху інструмента; ремонтпридатність; керуюча програма.

**Постановка проблеми.** Впровадження сучасних методів виготовлення деталей на базі комп'ютерних САМ-САД технологій для проєктування та виготовлення деталей на верстатах з числовим програмним керуванням у багатьох випадках дозволяє реалізувати виготовлення таких деталей, яке раніше було ускладнене або неможливе. На жаль, у машинобудівній галузі України ці технології впроваджуються недостатньо активно, що стримує ефективність її розвитку. Водночас значна кількість діючих машинобудівних підприємств забезпечена сучасними прикладними САМ-САД системами проєктування та металорізальним обладнанням з ЧПК, в тому числі багатокординатними обробляючими центрами, токарно-фрезерними верстатами з декількома шпинделями та інструментальним магазином тощо.

Особливу актуальність цей підхід набуває за необхідності виготовлення таких специфічних деталей, від яких вимагається надійність і довговічність у процесі експлуатації. Наприклад, ними можуть бути деталі технологічного обладнання підприємств, що зношуються внаслідок тривалої його експлуатації та несприятливих умов і підлягають заміні в процесі ремонту обладнання, а на підприємстві немає можливості замінити їх на серійно виготовлені запасні частини, оскільки вони відсутні.

На сьогодні багато підприємств харчової, переробної та інших галузей використовують технологічне обладнання, що виготовлене понад 20–25 років тому та яке потребує повної заміни, капітального ремонту або заміни окремих зношених деталей, але при цьому запасні частини до нього вже серійно не виробляються.

У той же час повна заміна діючого технологічного обладнання вимагає суттєвої переробки технологічних схем у виробничому процесі підприємства та значних фінансових витрат, що є економічно недоцільним. Це в свою чергу зменшує ремонтпридатність діючого технологічного обладнання та ускладнює ефективну реалізацію виробничих процесів на підприємстві [1, с. 1–7]. За таких умов найбільш раціональним шляхом є виготовлення окремих швидкозношуваних деталей та вузлів, що підлягають заміні під час ремонту діючого обладнання за індивідуальним замовленням.

Саме з такою метою застосування сучасних комп'ютерних CAD-CAM технологій для проектування і виготовлення зношених деталей та вузлів є виправданим і економічно доцільним.

**Аналіз останніх досліджень.** Сучасний ринок потребує від підприємств виготовлення деталей високої точності та шорсткості. Відповідно, щоб залишитися конкурентоспроможним, підприємство вимушене використовувати у своїх виробничих процесах сучасні CAD-CAM системи в сфері технічної та технологічної підготовки виробництва й сучасне металорізальне обладнання з ЧПК. Це пояснюється тим, що обладнання цього типу має високий рівень автоматизації, високу продуктивність, гнучкість і забезпечує високу точність механічної обробки деталей і суттєво підвищує коефіцієнт використання матеріалу та якість виробів.

Водночас за сучасних економічних відносин, коли на підприємствах зруйновано планову систему технічного обслуговування та ремонтів технологічного обладнання, існує гостра потреба в одиничному виготовленні окремих частин або деталей для обслуговування та ремонту діючого технологічного обладнання. Найбільш раціональним шляхом є виготовлення таких одиничних деталей на замовлення з використанням сучасних CAD-CAM систем та металорізальних верстатів з ЧПК.

При цьому важливу роль відіграє оптимальний вибір сучасних CAD-CAM систем розробки технологічних маршрутів обробки та синтезу керуючих програм для виготовлення деталей на металорізальних верстатах з ЧПК.

Для розробки технологічних маршрутів та керуючих програм для виготовлення деталей найбільш поширеними програмними комплексами, що активно використовуються на підприємствах України, є такі CAD-CAM системи: «ESPRIT», «Creo Parametric», «CAD-система NX», «Autodesk Inventor», «SolidWorks», «CATIA» тощо [2–5].

**Мета статті** – дослідити доцільність використання та можливості CAD-CAM систем «Autodesk Inventor», «ESPRIT» та «Creo Parametric» і сучасного вертикально-фрезерного обробного центру з ЧПК моделі Haas UMC-750 для автоматизованого проектування технологічного процесу, розробки керуючої програми для виготовлення одиничних деталей складної геометричної форми, що потребують заміни в умовах відсутності серійно виготовлених запасних частин, необхідних для обслуговування або ремонту технологічного обладнання.

**Викладення основного матеріалу.** Найбільш поширеною та зручною для автоматизованої розробки технологічних процесів виготовлення швидкозношуваних деталей на металорізальних верстатах з ЧПК є САМ-системи «ESPRIT» і «Creo Parametric» та CAD-система «Autodesk Inventor» [2, 4].

Програмний комплекс «ESPRIT» (виробник – компанія DP Technology, США) – це високоефективна автоматизована виробнича САМ-система, що застосовується для забезпечення автоматизації програмування обробки деталей для сучасних багатоопераційних та багатоосьових токарних, фрезерних і електроерозійних верстатів з ЧПК.

САМ-система «ESPRIT» забезпечує механічну обробку деталей складної геометричної форми (тверде тіло, поверхня або каркасна геометрія виду). При цьому універсальний постпроцесор створює G-коди для верстата, а твердотільна візуалізація і попередня перевірка технології обробки деталі виконується динамічними твердотільними моделями для забезпечення оптимальної якості. Наявність повноцінної візуалізації середовища обробки в «ESPRIT» дає можливість програмісту та оператору побачити процес обробки деталі в динаміці, визначити зарізи інструмента і передбачити можливість його зіткнення заготовкою. Оперативне внесення змін як до параметрів розмірів різального інструмента, так і в саму технологію скорочує час на налагодження керуючої програми і виготовлення чистової деталі й знижує її собівартість. Крім того, цей програмний комплекс дозволяє зменшити вплив людського фактора при розробці керуючих програм для верстатів з ЧПК, досягнути максимальної продуктивності та використати весь потенціал обладнання.

Програмний комплекс «ESPRIT» може синхронізувати одночасну роботу різальних циклів, використовуючи будь-яку комбінацію револьверних головок і шпинделів, а його постпроцесори сумісні з технологічним обладнанням для всіх провідних виробників. До складу програмного комплексу входять цифрові пакети верстатів (Digital Machine Package – DMP), що дозволяє системі враховувати особливості кінематики певного верстата, на якому здійснюється обробка. У такий пакет входить постпроцесор математичної моделі верстата, тобто цифровий двійник обладнання, який створено на основі 3D-моделей і кінематичних зв'язків верстата. Наявність бази цифрового інструмента, динамічних моделей пристроїв, що стандартно входять у базовий функціонал «ESPRIT», дозволяє повною мірою відтворити середовище обробки. При цьому «ESPRIT» підтримує кінематику верстата та надає повноцінну візуалізацію процесу

обробки деталі, забезпечує функцію виявлення зіткнень інструмента з заготовкою, що гарантує отримання правильно згенерованої керуючої програми. Ці важливі задачі розв'язуються за допомогою об'ємних геометричних моделей, які є продуктами роботи CAD-систем. Програма дозволяє відкрити CAD-файл незалежно від того, в якому середовищі він створений [2].

CAD-система «Autodesk Inventor» є однією з кращих графічних систем і призначена для проектування тривимірних твердотілих моделей деталей: валів, втулок, циліндричних прямозубих шестерень внутрішнього і зовнішнього зачеплення, шківів, муфт тощо [6, 7]. Вона дає можливість оформлення та виготовлення проектної та конструкторсько-технологічної документації згідно з вимогами ЄСКД, забезпечує роботу з меню CAD-систем, збереженість файлу в різних форматах (CDW, JPEG, CAD) та відкриття його в інших програмах. Під час внесення змін у модель, яку виконано в графічній системі «Autodesk Inventor», зображення на робочому кресленні деталі оновлюються автоматично.

У CAD-системі «Autodesk Inventor» для створення об'ємних зображень деталей як тривимірні моделі застосовуються принципи твердотілого і поверхневого параметричного проектування. Основою для отримання моделі деталі в системі «Autodesk Inventor» є плоский ескіз, за яким будується базовий тривимірний об'єкт. Це дає можливість забезпечити різноманітність та оптимальні умови для вирішення найскладніших завдань механічної обробки [7].

Для прикладу розглянемо використання CAD-CAM систем «Autodesk Inventor», «ESPRIT» і «Creo Parametric» та вертикально-фрезерного обробного центру з ЧПК для розробки технологічного маршруту розробки керуючої програми для верстата з ЧПК для виготовлення робочого колеса відцентрового електронасоса КМ 65-50-220 замість зношеного, що виконано на замовлення ТОВ «Укрпродпереробка».

Моноблочний відцентровий електронасос КМ 65-50-220 (виготовлений у 1994 р.) використовується в технологічному ланцюгу водоочищення підприємства. Цей електронасос призначено для перекачування стічних вод при їх реагентно-флотаційному очищенні. Швидкозношуваними деталями в електронасосі, що підлягають заміні при ремонті, є проточна камера та робоче колесо, які виготовлені з сірого чавуну.

Візуальні та мікроскопічні дослідження зношення робочого колеса, яке експлуатувалося тривалий час, показало переважно гідроабразивний характер його руйнування, оскільки стічні води містять не тільки залишки переробки у вигляді шкіри, кісток тощо, піску та інших абразивних складових, які є у промислових відходах харчових підприємств [8, с. 316–317; 9, с. 8–9].

За серійного виробництва деталей та запасних частин для електронасосів такого типу проточна камера та робоче колесо виготовляються методом лиття в піщано-глиняні форми або лиття за витошлюваними моделями з подальшою механічною обробкою окремих поверхонь для зняття поверхневого дефектного шару та місць з'єднань з іншими деталями. Відповідно, виготовлення цих деталей в умовах одиничного ремонтного виробництва за такою технологією не є рентабельним.

Водночас повна заміна діючого обладнання на інше в структурі технологічного ланцюга підприємства вимагає його суттєвої модернізації та переробки, що економічно недоцільно.

В процесі технологічної підготовки виготовлення робочого колеса відцентрового електронасоса КМ 65-50-220 виникла необхідність вдосконалення його конструкції шляхом збільшення кількості робочих лопатей на чотири для підвищення інтенсивності його ударно-хвильової дії на середовище і додаткового подрібнення в проточній робочій камері органічних забруднювачів, що в свою чергу підвищить якість та продуктивність водоочищення [9, с. 20–21]. Конструкція вдосконаленого робочого колеса відцентрового електронасоса КМ 65-50-220 наведена на рисунку 1.

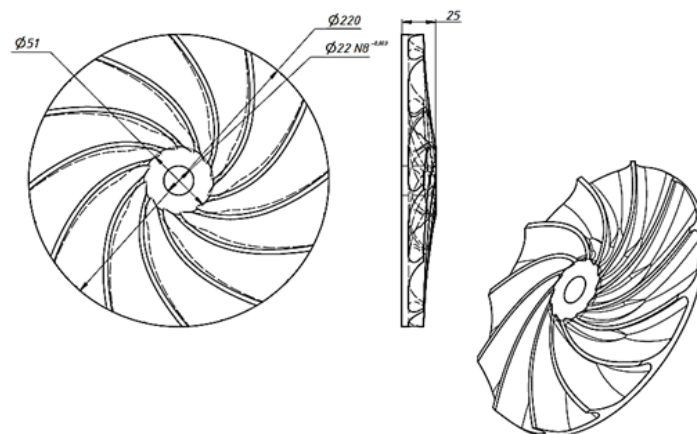


Рис. 1. Вдосконалене робоче колесо відцентрового насоса КМ 65-50-220

На першому етапі дослідження можливостей CAD-CAM систем у середовищі «Autodesk Inventor» було створено об'ємну 3D-модель робочого колеса насоса, після чого цей CAD-файл було завантажено в середовище CAM-системи «ESPRIT». Завантажену 3D-модель було розбито на каркас з метою доступу до всіх геометричних елементів (ліній, точок, кривих, площин тощо) під час моделювання технологічного процесу. Після цього було задано параметри розміщення поверхонь деталі відносно системи координат XYZ та обирали вид заготовки. Початок відліку осей координат у цьому випадку прийнято від верхнього торця деталі (рис. 2), оскільки обробка буде вестись зверху-вниз. При цьому вісь Z завжди є віссю інструмента.

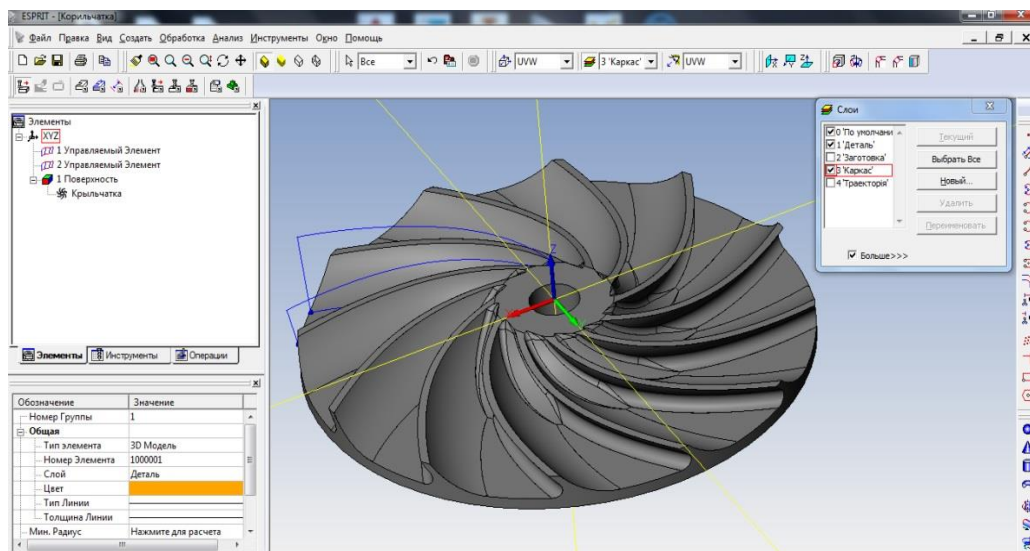


Рис. 2. Завантажена 3D-модель робочого колеса електронасоса в програмі «ESPRIT» та розміщення її відносно осей координат верстата

Конструкцію 3D-моделі заготовки для робочого колеса в системі «ESPRIT» можна створювати декількома методами. Перший метод – заготовка створюється в будь якому іншому CAD-середовищі «Autodesk Inventor», «Solid Work», «КОМПАС» тощо, а потім завантажується в середовище «ESPRIT» функцією об'єднання. Другий – це створення 3D-моделі заготовки безпосередньо в самому програмному комплексі «ESPRIT». 3D-модель заготовки разом з готовою деталлю наведено на рисунку 3.

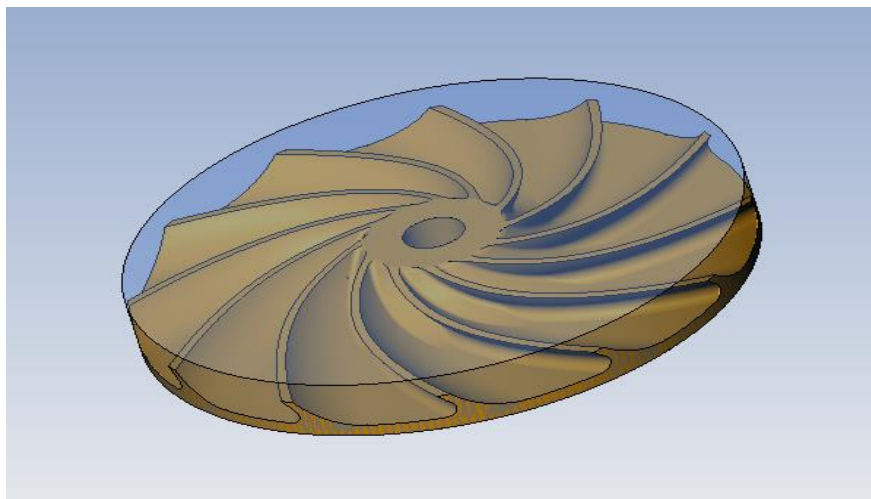


Рис. 3. 3D-модель заготовки з готовою деталлю

На наступному етапі дослідження було задано траєкторію руху різального інструмента. Для робочого колеса електронасоса з прийнятою кількістю лопатей було застосовано методуку «5-ти осьового фрезерування імелера». Для цього створено два управляючі елементи, які розміщені між двома лопатями і проходять по їхнім поверхням (рис. 4). Управляючий елемент було задано по торцю і нижній

кромці лопаті, але оскільки після створення він є суцільним, його розбивали на каркас. Це зроблено з метою зміни його початкової точки, яка має знаходитися на певній відстані від готової деталі.

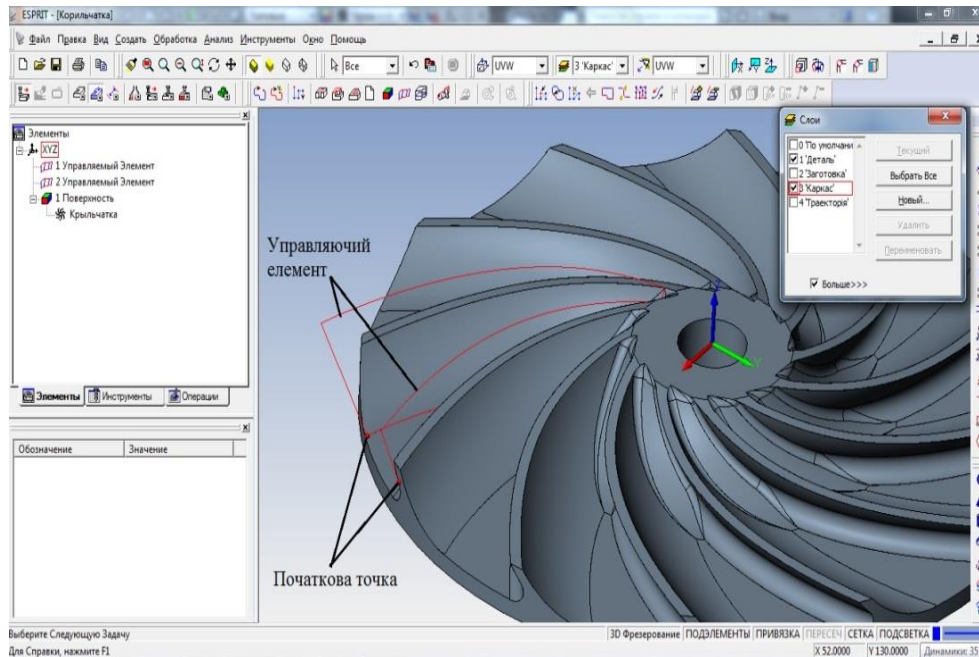


Рис. 4. Управляючі елементи та їх початкові точки

Після закінчення створення управляючих елементів, розробляється траекторія руху різального інструменту для верстата з ЧПК, задаються режими різання (рис. 5), траекторія підходів і відходів різального інструменту та вказуються параметри інструмента (рис. 6).

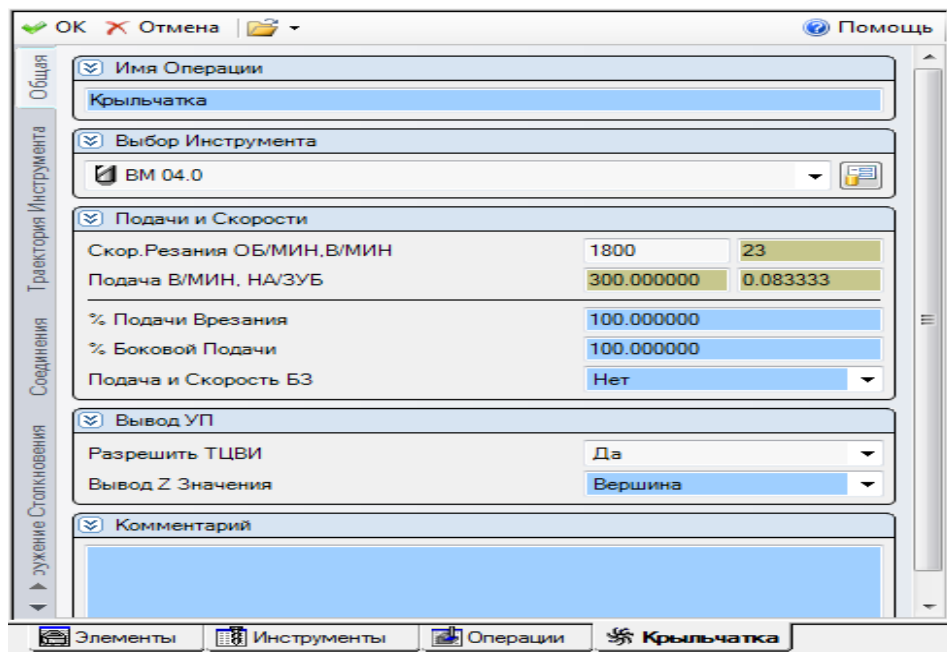


Рис. 5. Завдання режимів різання



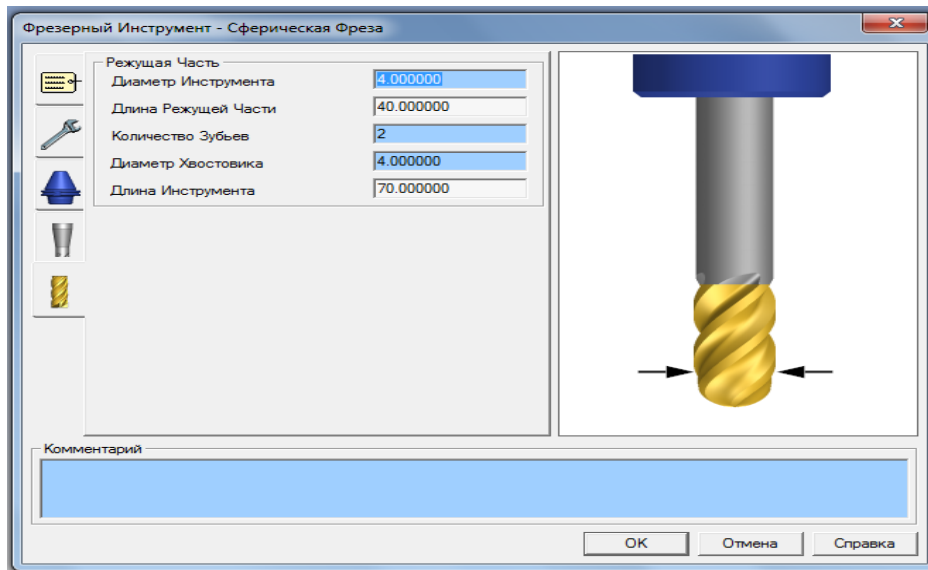


Рис. 6. Завдання параметрів різального інструмента

Після вибору всіх параметрів різального інструмента та режими різання, що необхідні для механічної обробки робочого колеса, програма розраховує траєкторію руху інструмента, проводить його аналіз, що дозволяє попередньо впевнитись у правильності розрахунків.

У подальшому процес обробки на верстаті переглянуто у режимі візуалізації. Для цього у середовищі програми «ESPRIT» завантажено файл параметрів вертикально-фрезерного обробного центра, який містить його 3D-модель, а також відомості про кінематику рухомих частин верстата, кількість рухомих осей та його технічні характеристики.

Моделювання технологічного процесу обробки робочого колеса електронасоса здійснено у середовищі програмного комплексу «Creo Parametric». Сам процес моделювання майже не відрізняється від наведеного вище, оскільки здійснюється за однаковим алгоритмом. Задано систему координат, основні параметри обробки, режими різання, тип інструмента, проведено розрахунок його траєкторії (рис. 7).

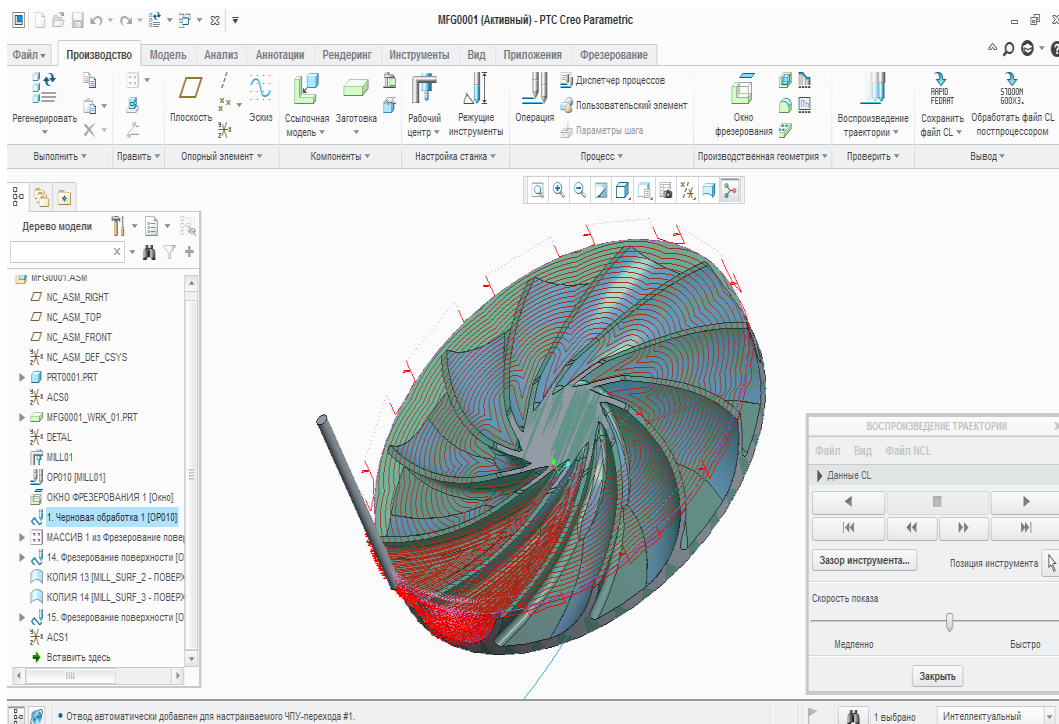


Рис. 7. Створення траєкторії руху різального інструмента із заданням режимів різання в середовищі програми «Creo Parametric»

Основною відмінністю розглянутих програмних комплексів є те, що у «Creo Parametric» можна створювати 3D-моделі, складальні одиниці та різного типу технічну документацію [7]. Порівняно з «ESPRIT», програмний комплекс «Creo Parametric» пропонує більше рішень щодо безпосереднього моделювання. У свою чергу «ESPRIT» забезпечує більш широкі можливості обробки деталей і створення технологічних процесів.

Виготовлення вдосконаленого робочого колеса електронасоса було здійснено на 5-осьовому вертикально-фрезерному обробному центрі Haas UMC-750 з ЧПК з розміром конуса шпинделя ISO 40 та інтегрованим двовісним поворотним столом. Верстат оснащений шпинделем з прямим приводом з частотою обертання 8100 об/хв і стандартно комплектується магазином інструменту 40 + 1 гніздо та боковим пристроєм для його заміни.

Двовісний поворотний стіл фрезерного центру UMC-750 забезпечує встановлення деталі практично під будь-яким кутом для 5-сторонньої обробки або забезпечує повний одночасний рух по п'яти осям для контурної або складної обробки.

Встановлення відремонтованого та вдосконаленого відцентрового електронасоса KM 65-50-220 у технологічний ланцюг виробничого процесу підприємства замовника ТОВ «Укрпродпереробка» дозволило підвищити якість і ефективність системи водоочищення.

**Висновки.** Використання сучасних CAD-CAM систем при проектуванні технологій виготовлення, розробки керуючих програм обробки для багатоопераційних верстатів з ЧПК в системі технологічної підготовки ремонту технологічного обладнання дає можливість:

- оперативного виготовлення запасних частин складної геометричної форми, що потребують заміни під час проведення ремонтних робіт технологічного обладнання, але на сьогодні не виготовляються в умовах серійного виробництва;

- вдосконалити (модернізувати) робочі параметри конструкцій деталей та механізмів технологічного обладнання, що підлягає ремонту, з метою підвищення його якості та продуктивності й забезпечення експлуатаційної надійності, довговічності та ремонтпридатності.

У подальшому авторами планується проведення досліджень технологічних можливостей використання сучасних CAD-CAM систем («Autodesk Inventor», «Solid Work», «CATIA», «ESPRIT» та «Creo Parametric») у системі технологічної підготовки ремонту механізмів та обладнання не тільки для харчової і переробної галузей, але й для інших галузей промисловості.

#### Список використаної літератури:

1. Сухенко Ю.Г. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв : підручник / Ю.Г. Сухенко, О.А. Литвиненко, В.Ю. Сухенко. – К. : НУХТ, 2010. – 547 с.
2. Esprit [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.dptechnology.ru/>.
3. Creo Parametric [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.ptc.ru.com/cad/creo/parametric>.
4. Система автоматизированного проектирования SolidWork [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://tesis.com.ru/software/solidworks/solidworks.php>.
5. САПР CATIA [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.vokb-la.spb.ru/soft/catia.html>.
6. PTC возлагает надежды на Creo 2.0 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.peweek.ru/industrial/rtrcle a/detail.php?ID=139556>.
7. Boucher Michelle Стратегия основных поставщиков CAD- и CAE-систем в 2014 году и дальше / Michelle Boucher [Electronic resource]. – Access mode : <http://www.cadcamcae.lv/N89/22-30.pdf>.
8. Кавітаційні пристрої в харчовій, переробній та фармацевтичній промисловості / О.А. Литвиненко, О.І. Некоз, П.М. Немирович, З.Кондрат. – К. : РВЦ УДУХТ, 1999. – 87 с.
9. Сухенко Ю.Г. Технологічні методи забезпечення довговічності обладнання харчової промисловості / Ю.Г. Сухенко, О.І. Некоз, М.С. Стечишин. – К. : Елерон, 1993. – 108 с.
10. Ловыгин А.А. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM-система / А.А. Ловыгин, Л.В. Твердовський. – М. : ДМК Пресс, 2012. – 280 с.

#### References:

1. Suhenko, Ju.G., Lytvynenko, O.A. and Suhenko, V.Ju. (2010), *Nadijnist' i dovgovichnist' ustatkuvannja harchovyh i pererobnyh vyrobnyctv*, pidruchnyk, NUHT, K., 547 p.
2. Esprit, [Online], available at: <http://www.dptechnology.ru/>
3. Creo Parametric, [Online], available at: <http://www.ptc.ru.com/cad/creo/parametric>
4. Systema avtomatyzyrovannogo proektyrovannja SolidWork, [Online], available at: <https://tesis.com.ru/software/solidworks/solidworks.php>
5. SAPR CATIA, [Online], available at: <http://www.vokb-la.spb.ru/soft/catia.html>
6. PTC vozlagaet nadezhdy na Creo 2.0, [Online], available at: <http://www.peweek.ru/industrial/rtrcle a/detail.php?ID=139556>
7. Boucher, Michelle *Strategija osnovnyh postavshykov CAD- y CAE-sistem v 2014 godu i dal'she*, [Online], available at: <http://www.cadcamcae.lv/N89/22-30.pdf>

8. Lytvynenko, O.A., Nekozy, O.I., Nemyrovych, P.M. and Kondrat, Z. (1999), *Kavitacijni prystroji' v harchovij, pererobnij ta farmacevtychnij promyslovosti*, RVC UDUHT, K., 87 p.
9. Suhenko, Ju.G., Nekozy, O.I. and Stechyshyn, M.S. (1993), *Tehnologichni metody zabezpechennja dovgovichnosti obladnannja harchovoi' promyslovosti*, Eleron, K., 108 p.
10. Lovygin, A.A. and Tverdovs'kij, L.V. (2012), *Sovremennyj stanok s ChPU i SAD/CAM-sistema*, DMK Press, M., 280 p.

**Литвиненко** Олександр Анатолійович – доктор технічних наук, професор Національного університету харчових технологій.

Наукові інтереси:

- надійність та довговічність обладнання;
- зношування конструкційних матеріалів;
- дослідження керамічних матеріалів.

<http://orsid.org/0000-0001-8975-2265>.

E-mail: litvinen@nuft.edu.ua.

**Бойко** Юрій Іванович – кандидат технічних наук, доцент Національного університету харчових технологій.

Наукові інтереси:

- технологія конструкційних матеріалів і машинобудування;
- комп'ютерні технології проектування.

<http://orsid.org/0000-0002-8972-7446>.

E-mail: BoykoYI@ukr.net.

**Яновський** Валерій Анатолійович – доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- проектування технологічного оснащення;
- комп'ютерні технології проектування.

<http://orsid.org/0000-0002-1702-4282>.

E-mail: gogolyan2010@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 29.01.2020.