

А. О. СКОРКІН, О. Л. КОНДРАТЮК, О. П. СТАРЧЕНКО

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ ХОЛОСТИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ
ІНСТРУМЕНТА ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ СКЛАДНИХ ПОВЕРХОНЬ**

Предметом дослідження в статті є вплив послідовності виконання переходів на допоміжний час, що витрачається на холосте переміщення верстата при зміні оброблюваної ділянки і при зміні інструменту. **Мета** дослідження полягає в підвищенні продуктивності процесу чистового фрезерування при обробці деталей складної форми шляхом мінімізації допоміжного часу, що дозволяє визначити оптимальну послідовність виконання переходів. В статті вирішуються наступні **завдання**: визначення основних підходів у формуванні загальних стратегій обробки деталей зі складними поверхнями, аналіз алгоритмічних рішень і методів визначення найліпшого маршруту переміщень інструментів від дільниці до дільниці і найвигіднішої послідовності обробки ділянок складної поверхні з урахуванням обмежень по переміщенням і стійкості інструменту, розробка математичної моделі мінімізації холостих переміщень при зміні оброблюваних ділянок і інструментів на основі точкового опису геометрії деталі. Використовуються такі **методи**: теоретичні та експериментальні методи дослідження, що включають методи системно структурного аналізу; методи математичної статистики; чисельні методи вищої математики, теорія графів. Отримано наступні **результати**: В результаті комплексних теоретичних і експериментальних досліджень виявлено методи оптимізації приватних і загальних стратегій при обробці деталей зі складними поверхнями. Розроблено метод визначення оптимального маршруту фрез одного типорозміру при русі між групою ділянок, що підлягають обробці. На основі точкового опису геометрії деталі розроблена математична модель мінімізації холостих переміщень при зміні оброблюваних ділянок. Визначено параметри, що забезпечують мінімізацію холостих переміщень при зміні оброблюваних ділянок і реалізацію алгоритмів розрахунку довжини і положень локальних площ безпеки для послідовно оброблюваних ділянок. **Висновки**: Застосування підходів у формуванні загальних стратегій обробки деталей зі складними поверхнями сприяє підвищенню продуктивності і ефективності використання дорогих багатоцільових верстатів. Застосування даного методу визначення найліпшого маршруту переміщень інструментів дозволяє визначити варіант маршруту з мінімальним значенням допоміжного часу, що витрачається на холості рухи інструментів.

Ключові слова: ЧПК; інструмент; фрезерування; проектування; складнопрофільна поверхня; чистова обробка.

Вступ

У сфері виробництва товарів одним з основних завдань, є зниження витрат, підвищення ефективності, скорочення циклу випуску й строків запуску виробів. Особливо це актуально для машинобудівних галузей промисловості, пов'язаних з виробництвом виробів, що мають складні форми. Тільки саме ретельне технологічне пророблення й створення різноманітного верстатного оснащення дозволяють досягти необхідного результату й одержати продукцію високої якості. Це, як правило, приводить до збільшення строку підготовчого періоду.

Особливою трудомісткістю відрізняється виготовлення деталей зі складними поверхнями таких, як деталі літальних апаратів і автомобілів, скульптурні об'єкти, прес-форми для одержання деталей тиском, оснащення для ливарного виробництва, об'єкти художнього змісту (наприклад, іконостаси й виробу ювелірної продукції).

Для виготовлення таких деталей у цей час в умовах серійного виробництва широко застосовуються фрезерні верстати із числовим програмним керуванням (ЧПК) при одночасному використанні систем автоматизованого проектування технологічних процесів.

До переваг фрезерних верстатів зі ЧПК ставиться:

- скорочення циклу виготовлення деталей;
- зниження вимог до кваліфікації робітників;
- гарантія повторюваності технологічного процесу;
- зменшення обсягів слюсарно-доводочних робіт.

За допомогою сучасних графічних систем автоматизованого проектування й виробництва виробів (CAD/CAM) суттєво спрощена підготовка керуючих програм для фрезерних верстатів зі ЧПК.

Автоматизоване програмування при розв'язку складних технологічних завдань дозволяє найбільше ефективно використовувати дороге встаткування, застосування якого дозволяє створювати виробу з поверхнями будь-якої складності, що задовольняють заданим вимогам по якості при мінімальних витратах часу на їхню обробку.

Суть руху різання полягає в крапковому торканні інструмента й деталі в процесі обробки. Час, затрачуване на цей рух інструмента, займає значну частину в оперативному часі обробки деталей і його прийнято вважати основним.

Холостий рух верстата являє собою суму холостих переміщень верстата при зміні фрез і при зміні оброблюваних областей. Час, затрачуване на холостий рух інструмента, є допоміжним. При чистовій обробці деталей, що мають складну форму й при значному числі оброблюваних зон, на які, як правило, розбивають складну поверхню, використовується велика кількість фрез. Це приводить до збільшення допоміжного часу, затрачуваного на холості переміщення верстата. Скорочення допоміжного часу при обробці деталей значно підвищує ефективність використання технологічного встаткування, особливо дорогих багатоцільових верстатів.

Слід зазначити, що й найпоширеніші сучасні САМ системи не мають модулів, що дозволяють оптимізувати послідовність виконання переходів, обумовлену різними формами окремих областей

поверхні, і використовуваний для їхньої обробки інструмент. Порядок обробки окремих ділянок поверхні деталі з різними формами областей, послідовність зміни інструмента, як показує практика, дотепер визначає технолог на основі особистого досвіду без застосування сучасних методів моделювання й оптимізації. Однак, найчастіше кількість варіантів послідовностей виконання переходів значно. Без застосування спеціальних алгоритмів і програмних засобів перебір великої кількості варіантів з повним аналізом наслідків вибору здійснити не можливо.

Аналіз проблеми і існуючих методів

Складна поверхня може бути витлумачена як "поверхня, у диференціальній околиці кожної крапки якої головні кривизни від однієї її крапки до іншої нескінченно близької крапки змінюються або по величині, або по орієнтації головних січних площ, або по величині й орієнтації головних січних площ одночасно" [1] (рис. 1).

У технічній літературі прийнято ділити деталі зі складними поверхнями по їхнім застосуванню в науці, техніці й технології на три класи: інструменти, деталі виробів, напівфабрикати й заготовки деталей. У роботах [4], [5] запропонована класифікація складних поверхонь, у якій кожний із класів ділиться, у свою чергу, на підкласи.

Клас інструментів ділиться на три підкласи: моделі, штампи й прес-форми.

Клас деталей можна підрозділити на:

- деталі механізмів і машин (авіаційна й автомобільна техніка, морські й річкові судна, протези органів людини й ін.);

- деталі приладів і товарів народного споживання (корпуси апаратури й побутової техніки, підосви для взуття, деталі іграшок, упакування для харчових продуктів, нафтопродуктів, косметики, побутової хімії й ін.);

- деталі, що мають самостійну художню цінність (скульптури, сувеніри, ювелірні прикраси, монети й медалі, іконостаси, ексклюзивні меблі та інше).

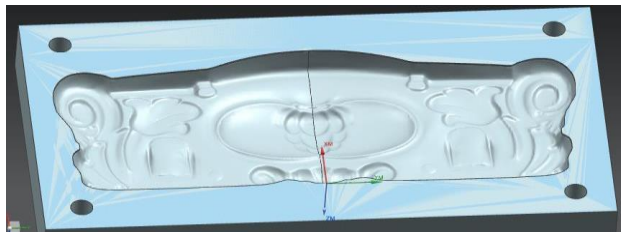


Рис. 1. Приклад складнопрофільної поверхні

Клас напівфабрикатів і заготовок становить продукція, яка є результатом виконання попередніх операцій формоутворення (виробу, отримані листові штампуванням в автобудуванні й літако- і суднобудуванні; кування, що йдуть на виготовлення великих штамів і прес-форм).

Одержання деталей зі складними поверхнями й високоточним виконанням їх розмірів у

машинобудуванні здійснюється на сучасних верстатах зі ЧПК, здатних виконувати складні рухи робочих органів із застосуванням відповідних різальних інструментів і певних методів обробки.

Метою даної статті є дослідження і в подальшому підвищення продуктивності процесу чистового фрезерування при обробці деталей складної форми шляхом мінімізації допоміжного часу, що дозволяє визначити оптимальну послідовність виконання переходів. В статті вирішуються наступні задачі:

- визначення основних підходів у формуванні загальних стратегій обробки деталей зі складними поверхнями,

- аналіз алгоритмічних рішень і методів визначення найліпшого маршруту переміщень інструментів від дільниці до дільниці і найвигіднішої послідовності обробки ділянок складної поверхні з урахуванням обмежень по переміщенням і стійкості інструменту,

- розробка математичної моделі мінімізації холостих переміщень при зміні оброблюваних ділянок і інструментів на основі точкового опису геометрії деталі

Рішення задачі

У сучасних САМ системах крок розподілу поверхні, вибір форми й розмірів інструмента, уведення параметрів стратегії обробки здійснюється не автоматизоване, а вручну. Особливо не простий для технологів виявляється завдання визначення границі між зонами поверхні, що не має явно вираженого контуру. Саме цей факт викликає зростаючий інтерес дослідників до пошуку оптимального розподілу поверхні, визначення форм і розмірів інструмента, вибору параметрів стратегії обробки.

Під локальним формоутворенням розуміється процес різання поверхні деталі в околиці поточної її крапки. Існує два фактори завдання, що впливають на розв'язок, синтезу локального формоутворення: параметри поверхні деталі й вихідної інструментальної поверхні в диференціальній околиці крапки їх торкання, і відносна локальна орієнтація цих поверхонь.

Локальне формоутворення – це, по суті, скалярний добуток значень подачі інструмента уздовж і поперек рядка формоутворення, розраховане в межах крапки торкання поверхні деталі й вихідної інструментальної поверхні. Найвигідніші його параметри повинні забезпечити досягнення максимуму локальної продуктивності формоутворення.

При регіональному формоутворенні розглядається процес утвору поверхні деталі в межах одному рядка на ній. Сутністю розв'язку завдання синтезу регіонального формоутворення є розрахунки параметрів самої вигідної траєкторії, при русі інструмента уздовж якої поточне значення ширини рядка

формування максимально, а формування при цьому площа рядка на поверхні деталі при інших однакових умовах найбільша.

Глобальне формування припускає облік часткової інтерференції сусідніх рядків формування й "крайовий ефект" – облік впливу на параметри процесу формування форми й параметрів границь контуру, що обмежує оброблювану поверхню деталі.

Завданням синтезу глобального формування є:

- відбір таких із сімейства ліній, отриманих у

результаті розв'язку завдання синтезу регіонального формування, які в якості траєкторій формування забезпечують досягнення максимуму глобальної ефективності;

- установлення області, у якій проявляється вплив "крайового ефекту" для того, щоб визначити найвигідніші траєкторії врізання інструмента в заготовку й виводу його з контакту з обробленою деталлю ("траєкторії врізань-виводів").

- визначення координат найвигіднішої крапки початку обробки деталі (рис. 2).

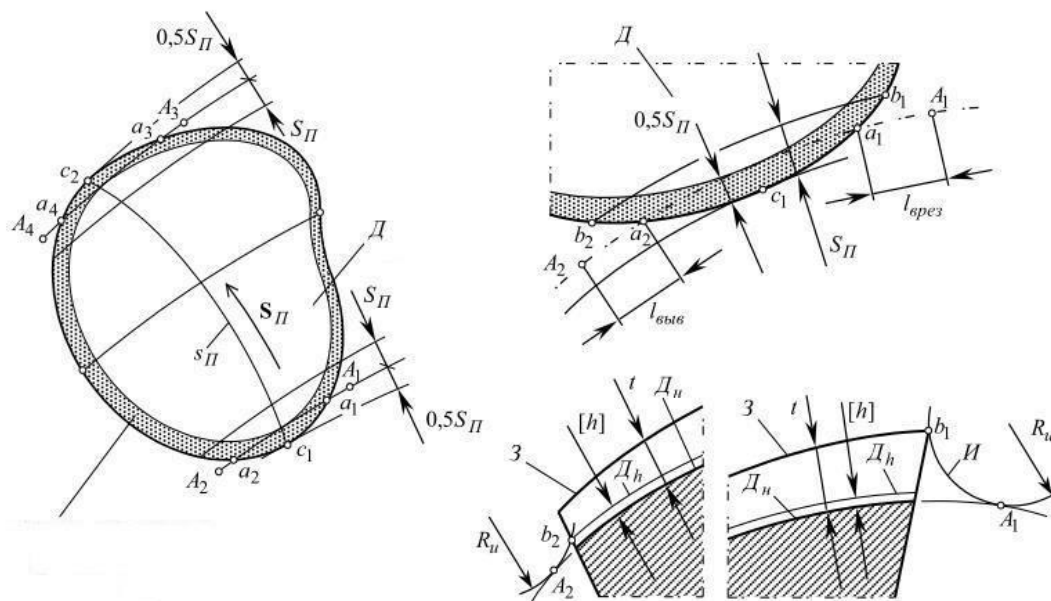


Рис. 2. Визначення положення крапки початку обробки складної поверхні деталі на багатокоординатному верстаті з ЧПК

У роботах [3], [8], [12 – 13] та [15] представлені результати досліджень і практичного застосування розробленої теорії оптимізації стратегії формування складних поверхонь (оптимальні траєкторії руху фрези) на трьохкоординатних фрезерних верстатах зі ЧПК. Обрані критерії оптимізації стратегій, розроблений метод вибору стратегій і їх параметрів, включає два основні етапи. Перший – визначення оптимальних параметрів для кожної зі стратегій (розглянуто 5 стратегій: окружна, радіальна, спіральна, растрова, стрічкова спіраль). Другий – порівняння максимальних значень середніх критеріїв оптимальності, отриманих для кожної зі стратегій. За результатами аналізу для обробки деталі рекомендується та стратегія, у якій цей критерій максимальний. За розробленою методикою для обробки деталі вибирається стратегія і її параметри таким чином, щоб напрямок, що задається, руху інструмента якнайменше відхилилося від теоретично оптимального напрямку, установленого з умови досягнення максимуму локальної продуктивності формування. При цьому одиничний вектор, напрямок якого в заданих координатах збігається з оптимальним напрямком формування, визначає теоретично оптимальний напрямок руху інструмента в деякій крапці деталі.

По запропонованому алгоритму розроблений модуль оптимізації стратегії обробки для вибору типу й параметрів стратегії чистової фрезерної обробки, який дозволяє в остаточному підсумку розрахувати наступні параметри:

- максимально досягне значення критерію;
- оптимальний кут растра;
- середній критерій для растрової стратегії при оптимальному куті растра;
- оптимальні координати центра спіральної стратегії;
- середній критерій для спіральної стратегії при оптимальних координатах центру;
- середній критерій для стратегії обробки по рівнях осі Z.

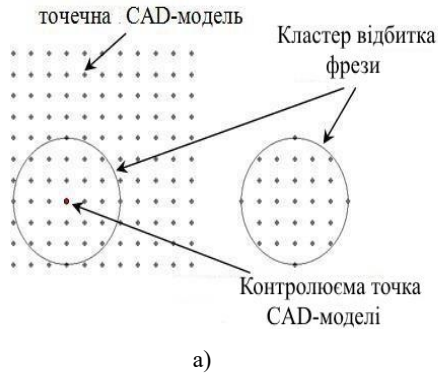
Сутність способу розподілу поверхні, який запропоновано, полягає в перевірці того або іншого інструмента на здатність відфрезерувати задану скульптурну поверхню, на підставі чого прораховуються області технологічних переходів для обраного типорозміру інструмента.

У процесі розв'язку представляється можливим:

- визначити розміри й комбінації кінцевих і сфероциліндричних фрез для обробки конкретної деталі на основі оцінки локальної та глобальної фрезеруємі;

- перевірити параметричним методом моделі на фрезеруємість за дискретними даними, представленими рівномірним масивом крапок або двовірним півтоновим растровим зображенням;

- знайти для інструментів заданої форми й розмірів кластерним методом оптимальні границі областей обробки, описувані контурними кривими, по



дискретно заданій моделі деталі (рис. 3). Кластерний метод побудований на методиці аналізу тривимірної крапкової моделі або двовірного півтонового растрового зображення.

- побудувати кубічні сплайни при апроксимації будь-якої кількості крапок замкненої кривої (рис. 4).

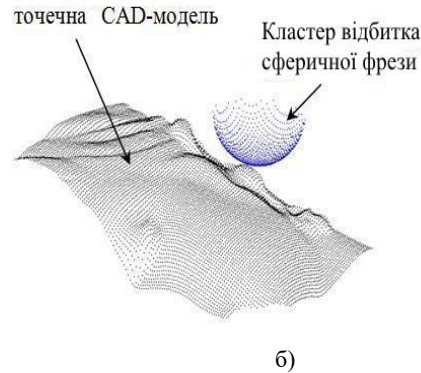


Рис.3. Оптимальні границі областей обробки: а) генерація кластера відбитка фрези; б) перевірка криволінійних ділянок крапкової CAD-моделі

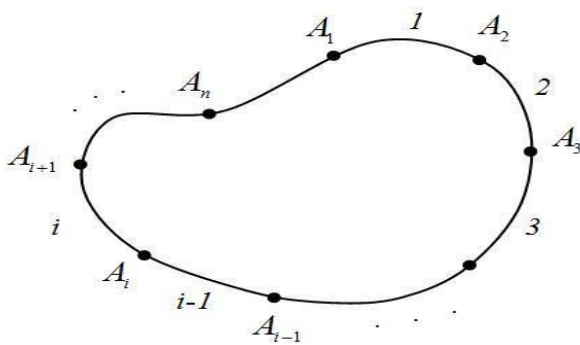


Рис. 4. Замкнена крива, що проходить через задані крапки

При чистовій обробці на фрезерних верстатах зі ЧПК довжина холостого переміщення при переході інструмента в межах двох оброблених ділянок залежить від локальної безпечної висоти, на яку інструмент повинен піднятися (безпечна висота забезпечує здійснення переходу інструмента від ділянки до ділянки без зіткнення інструмента із заготовкою або обробленою поверхнею деталі).

Мінімальне значення локальної безпечної висоти h може бути прийняте таким, при якому відбудеться торкання поверхні, кінцевої частини інструмента $fc(x, y, z)$ з поверхнею деталі $F(x, y, z)$.

Умова торкання двох поверхонь описує рівняння:

$$F(xm, ym, zm) = fc(xm, ym, zm),$$

де xm, ym, zm – координати крапки торкання.

Мінімальне значення локальної безпечної висоти h_{min}

$$h_{min} = zm + lpr + hz.$$

Однак, як показує практика, для деталей зі складними поверхнями, що мають велику кількість екстремумів, виявляється важким створити математичне рівняння $F(x, y, z)$.

У таких випадках можна скористатися універсальним і стійким методом, заснованим на кластерному аналізі моделі, який здатний досліджувати поверхню деталі будь-якої геометричної форми. Особливістю даного методу є розбивка електронної моделі деталі, що містить складні поверхні, на кластери (масиви крапок).

Кластерний метод дозволяє визначити zm по наступній формулі:

$$z_m = \max_{i \in P} (z_i),$$

де i – i -а крапка, що належить контрольованій геометрії P ; z_i – координата центру інструмента, певна за умови зіткнення кластера інструмента з i -ю крапкою (рис. 5).

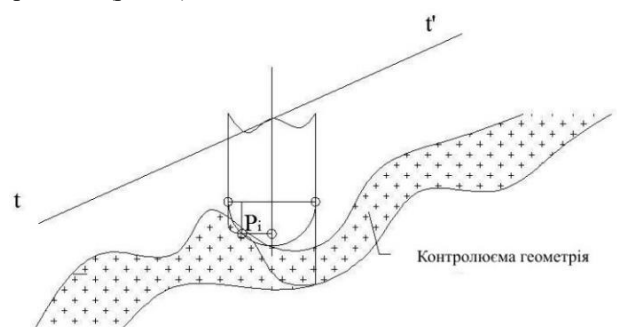


Рис. 5. Схема контакту інструмента із крапкою на контрольованій поверхні

Отже, самий короткий маршрут від попереднього ділянки до наступного при чистовій обробці деталі зі складною поверхнею може бути розрахований із застосуванням кластерного методу.

Запропонована математична модель, дозволяє визначити послідовність виконання переходів за умови мінімізації довжини траєкторії холостих переміщень інструмента при русі між двома заданими крапками й наявності різного роду обмежень

(геометрія оброблюваної заготовки й пристосування, обмежень, пов'язаних з розмірами робочої зони верстата й ін.). При цьому на першому етапі розраховуються всі можливі варіанти (припустимих і неприпустимих) послідовностей по відомій формулі евристичного алгоритму:

$$M^{(0)} = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\}, i = 1, \dots, n,$$

де a_i – технологічний перехід; n – необхідне число переходів для обробки заготовки.

Загальна теоретична кількість усіляких варіантів послідовностей обробки однієї деталі (рис. 6) може бути представлено у вигляді графа.

На другому етапі виключаються неприпустимі послідовності переходів технологічного

$$M^{(-)} = \left\{ \{a_{11}^{(1)}, a_{21}^{(1)}, \dots\}, \dots, \{a_{1i}^{(i)}, a_{2i}^{(i)}, \dots, a_{ni}^{(i)}\}, \dots, \{a_{1s}^{(s)}, a_{2s}^{(s)}, \dots, a_{rs}^{(s)}\} \right\}, i = 1, \dots, S, j = \overline{1, S}, a = 1, \dots, r,$$

де $\{a_{1i}^{(i)}, a_{2i}^{(i)}, \dots, a_{ni}^{(i)}\}$ – i -а неприпустима послідовність переходів технологічного процесу; S – безліч неприпустимих ланцюжків переходів.

На третьому етапі порівнюють припустимі

$$F = \sum_{i=0}^n \sqrt{\frac{(x_{i+1} - x)^2}{V_x} + \frac{(y_{i+1} - y)^2}{V_y} + \frac{(z_{i+1} - z)^2}{V_z}} = \sum_{i=0}^n \sqrt{\frac{(x_{i+1} - x)^2}{V_x} + \frac{(\xi_{i+1} - \xi)^2}{V_y} + \frac{(\psi_{i+1} - \psi)^2}{V_z}} =$$

$$= \sqrt{\frac{(\Delta x)^2}{V_x} + \frac{(\xi_1 - y_0)^2}{V_y} + \frac{(\psi_1 - z_0)^2}{V_z}} + \sqrt{\frac{(\Delta x)^2}{V_x} + \frac{(y_{n+1} - \xi_n)^2}{V_y} + \frac{(z_{n+1} - \psi_n)^2}{V_z}} + \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{\frac{(\Delta x)^2}{V_x} + \frac{(\xi_{i+1} - \xi_i)^2}{V_y} + \frac{(\psi_{i+1} - \psi_i)^2}{V_z}}.$$

$$\Delta x = \frac{x_{n+1} - x_0}{n+1}, x_{i+1} = x_i + \Delta x, i = 1, \dots, n, y \rightarrow \xi, z \rightarrow \psi.$$

У результаті практичної реалізації алгоритму керування процесом побудови траєкторій холостих переміщень інструмента на багатоопераційних токарних верстатах при обробці деталей з відношенням довжини до діаметра менш 0,5 досягається скорочення допоміжного часу на 20-30% або штучного часу на 5-10%. При цьому якість обробки відповідає заданому.

Для подальшого визначення оптимальних при холостому переміщенні фрез певного типорозміру, необхідно мати вихідні дані, які повинні включати інформацію про форму й розміри різального інструменту, і про масив крапок з координатами (x, y, z) , отриманих шляхом розбивки геометрії моделі площ, нормально розташованими стосовно осі z , із заданою дискретністю h (рис. 7). У результаті розбивки тривимірної електронної моделі одержали таблицю координат проекції крапок на ці площини (рис. 8).

Кластерний аналіз при розв'язку завдання визначення zk проводиться поетапно, при цьому:

Етап 1. Визначення крапок, що належать контрольованій геометрії, що й представляють безліч U ;

Етап 2. Визначення координату zk j локальну площину, що описує, безпеки, на якій фреза стикається із крапками, що належать безлічі U , на j -ій висоті при її русі по напрямковій tt' .

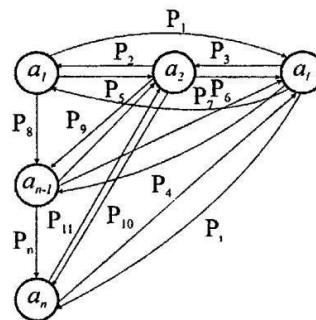


Рис. 6. Граф можливих технологічних переходів при обробці деталі

процесу, які представлені у вигляді безлічі:

послідовності між собою на предмет максимально ефективного маршруту з мінімальним часом холостих переміщень інструмента.

На цьому етапі визначається загальний час траєкторій переміщень інструмента:

Етап 3. Визначення максимального значення з безлічі, що є значенням висоти zk , на якій фреза стосується контрольованої геометрії електронної моделі при описі руху фрези по напрямковій tt' .

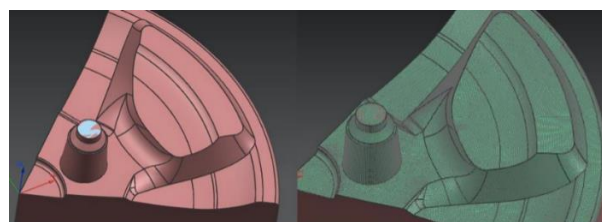
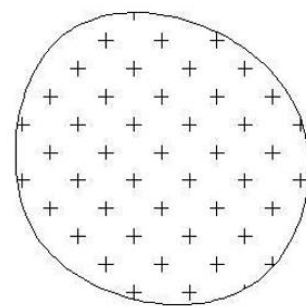


Рис. 7. Розбивка моделі на ділянки: а) тривимірна електронна модель; б) тривимірна електронна модель із виділеними масивами крапок



x	y	z
2.35468	5.53462	7.23455
2.35466	5.53462	7.23457
2.35465	5.53462	7.23459
2.35464	5.53462	7.23461
2.35463	5.53462	7.23463
2.35462	5.53462	7.23465
2.3546	5.53462	7.23467
2.35459	5.53462	7.23469
2.35458	5.53462	7.23471
2.35457	5.53462	7.23473

Рис. 8. Таблиця координат крапок, отриманих у результаті розбивки 3-Д моделі

На першому етапі для відбору крапок $\{x_i, y_i, z_i\}$ тривимірної моделі деталі, які належать безлічі U , виконуються наступні кроки.

По-перше, на безлічі крапок моделі "накладається" прямокутник ABCD з параметрами, що враховують положення кінцевої / і початкової крапок / (рис. 9). Метою виділення прямокутника ABCD є "районування" крапок, які можуть належати контрольованій геометрії.

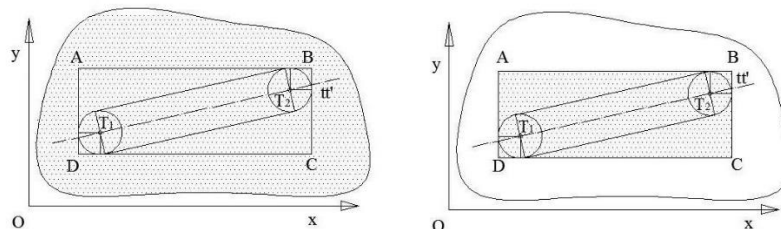


Рис. 9. Районування крапок прямокутником ABCD

По-друге, здійснюється перехід від системи координат $Oxyz$ до системи координат $Ox'y'z'$, у якій вісь Ox' паралельна напрямку tt' (рис. 10).

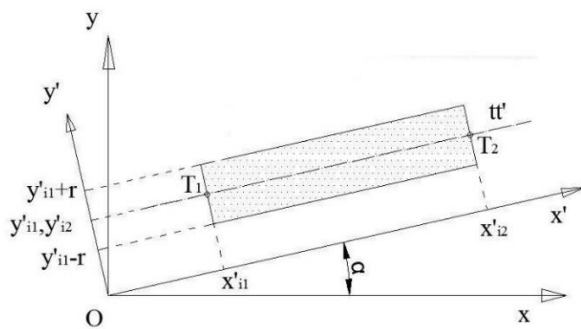


Рис. 10. Перетворення системи координат

На другому етапі аналізується положення інструмента при русі по напрямкові tt' на висоті zk_j , при торканні оброблюваної поверхні в крапці $C(x_c, y_c, z_c)$ ($C \in xU$). Крапка I_3 для кінцевого інструмента розташовується в діаметральній площині, при цьому перетин фрези такою площиною має найбільшу площу (рис. 11).

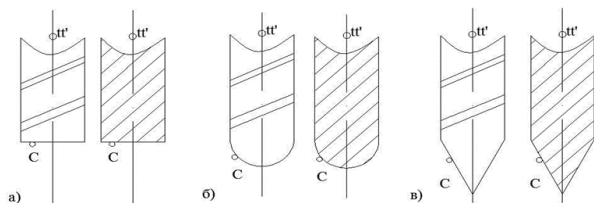


Рис. 11: Схема торкання фрези з контрольованою геометрією: а) кінцевої циліндричної; б) сфероциліндричної; в) конічними фрезами

Надалі значення zk_j повинні визначатися для трьох випадків стосовно:

- до кінцевої циліндричної фрези (рис. 11 а);
- до сфероциліндричної фрези (рис 11 б);
- до конічної фрези (рис. 11 в);

Координати (x_i, y_i) , що належать прямокутнику ABCD, визначаються по наступній формулі:

$$\min(x_{i1}, x_{i2}) - R \leq x_i \leq \max(x_{i1}, x_{i2}) + R$$

$$\min(y_{i1}, y_{i2}) - R \leq y_i \leq \max(y_{i1}, y_{i2}) + R$$

де R – радіус фрези.

З рис. 10 випливає, що висота zk_j крапки I_3 стосовно до кінцевої циліндричної фрези дорівнює висоті вершини D.

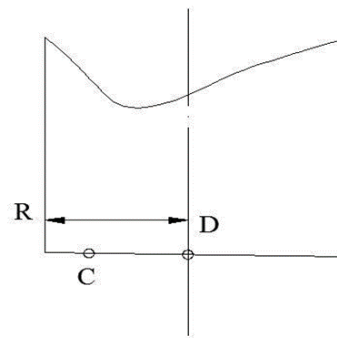


Рис. 12: Схема визначення розрахункової висоти вершини

При пошуку найвигіднішої послідовності обробки всіх ділянок складної поверхні фрезами одного типорозміру з обліком їх стійкості може бути використаний алгоритм мінімізації холостих переміщень від одного оброблюваного ділянки до іншого. Таке завдання може бути описана графом $G=(V, E)$ з безліччями вершин $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ і ребер $E = \{e\}$ (рис. 13).

При цьому v_0 може асоціюватися з позицією зміни фрез; v_1, \dots, v_n – оброблені ділянки, довжина ребра $e \in E$, що з'єднує дві вершини графа з довжиною холостого переміщення Se при зміні оброблюваного ділянки. При побудові моделі час, за який фреза повинна завершити обробку ділянки – T_i ; гарантований період стійкості фрези – Q .

Необхідно знайти m маршрутів фрез із мінімальною сумарною довжиною їх холостих переміщень. Ці маршрути повинні починатися й закінчуватися в позиції зміни фрез v_0 , фреза повинна проходити через кожен ділянку v_i тільки один раз. При цьому, кожна ділянка повинен бути повністю оброблено однієї фрезою. Крім того, робочий час у кожної фрези не повинне перевищувати її заданого періоду стійкості Q .

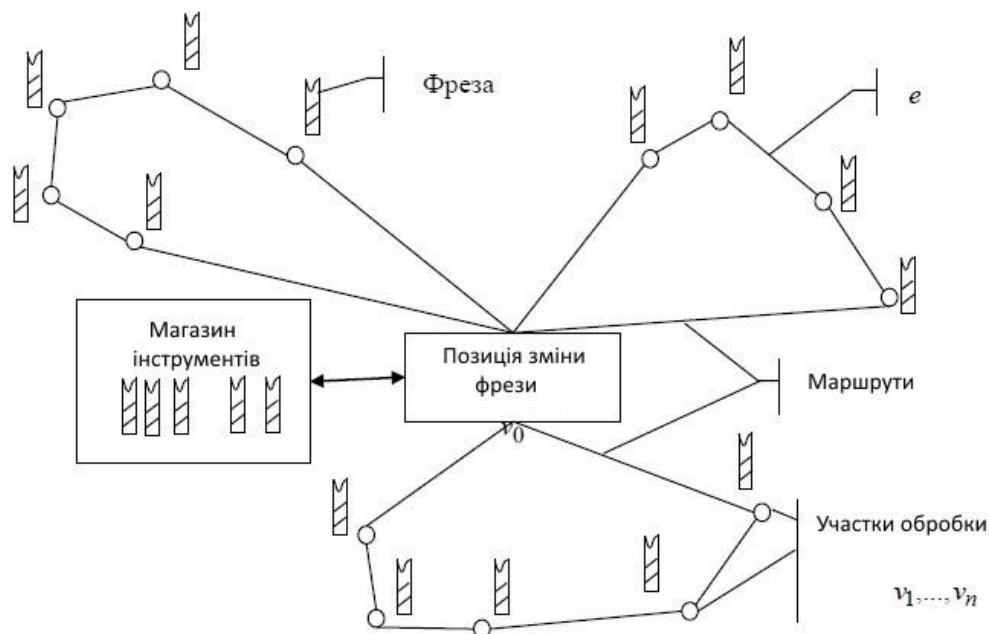


Рис. 13. Схема до розв'язку завдання маршрутизації інструментів

Як відзначилося раніше, завдання такого роду може бути вирішено двома способами: точним і приблизним.

Точний метод розв'язку придатний у випадку невеликої кількості оброблюваних ділянок і дає оптимальний варіант.

Приблизний метод розв'язку широко розповсюджений у випадку значної кількості оброблюваних ділянок. При його застосуванні одержуваний розв'язок наближається до оптимального.

Висновки

В результаті комплексних теоретичних і експериментальних досліджень виявлено методи оптимізації приватних і загальних стратегій при

обробці деталей зі складними поверхнями. Застосування їх в комплексі сприяє підвищенню продуктивності і ефективності використання дорогих багатоцільових верстатів. На основі аналізу раніше проведених досліджень здійснено вибір приватних стратегій обробки деталі: розподіл поверхні на окремі конструктивно-технологічні області, вибір інструментів і локальної стратегії обробки для кожного виділеного ділянки. Отримано математичні залежності параметрів маршрутизації інструментів, розроблені алгоритми визначення найліпших маршрутів інструментів при зміні ділянок обробки і зміни фрез з урахуванням їх стійкості. На основі алгоритму і математичного апарату, отримано послідовності виконання технологічних переходів, які мінімізують холості переміщення інструментів при обробці фрезеруванням складних поверхонь на верстатах з ЧПК.

Список літератури

1. Радзевич С. П. Формообразование поверхностей деталей. Растан, 2001. 592 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя / Под ред. А. М. Дальского. М. : Машиностроение-1, 2003. 912 с.
3. Шикин Е. В., Боресков А. В. Компьютерная графика. Полигональные модели. М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. 464 с.
4. Скоркін А. О., Кондратюк О. Л. Основні принципи комплексного управління складально-різьбоутворюючим процесом. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2017. № 2 (2). С. 77–85. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.2.077>.
5. Баранчукова И. М., Гусев А. А., Крамаренко Ю. Б. и др. Проектирование технологии автоматизированного машиностроения : Учеб. для машиностроит. спец. вузов / Под ред. Ю. М. Соломенцева. 2-е изд. М. : Высш. Шк., 1999. 416 с.
6. Кормен Т. и др. Алгоритмы. Построение и анализ / пер. с англ. И. В. Красикова, Н. А. Ореховой, В. Н. Ромашова. 2-е изд. М. : Вильямс, 2005. 1290 с.
7. Baldacci R., Hadjiconstantinou E., Mingozzi A. An Exact Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem Based on a Two-Commodity Network Flow Formulation. *Operations Research*. 2004. Vol. 52. P. 723–738.
8. Wallner J. Smoothness and Self-Intersection of General Offset Surfaces. *Geometry*. 2001, Issue 70. P. 176–190.
9. Archetti C., Hertz A., Speranza M.G. A tabu search algorithm for the split delivery vehicle routing problem, *Transportation Science*. 2006. Vol. 40. P. 64–73.
10. Baldacci R., Hadjiconstantinou E., Mingozzi A. An Exact Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem Based on a Two-Commodity Network Flow Formulation. *Operations Research*. 2004. Vol. 52. P. 723–738.
11. Barnhill R. E., Farin G., Fayard L., Hagen H. Twists, Curvatures and Surface Interrogation. *Computer Aided Design*. 1988. Vol. 20. No. 6. P. 341–346.

12. Beck J. M., Farouki R. T., Hinds J. K. Surface Analysis Methods. *EEE Computer Graphis and Application*. 1986. Vol. 6. No. 12. P. 18–36.
13. Clarke G., Wright J. W. Wright Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*. 1964. No. 12. P. 568–581.
14. Cohen E., Lych T., Schumaker L. Algorithms for degree raising for splines. *ACM Transactions on Graphics*. 1986. Vol. 4. No. 3. P. 171–181.
15. Aksen D., Zyurt Z., Aras N. Open vehicle routing problem with driver nodes and time deadlines. *Journal of the Operational Research Society*. 2006. Vol. 58. Issue 9. P. 255–261.
16. Dill J. C. An Application of Color Graphics to the Display of Surface Curvature. *SIGGRAPH*. 1981. P. 153–161.

References

1. Radzevich, S. P. (2001), *Shaping surfaces of parts [Formoobrazovanie poverhnostej detalej]*, Rastan, 592 p.
2. Directory technologist-mechanical engineer [Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja] / Edited by A. M. Dalsky, Moscow : Engineering-1, 2003, 912 p.
3. Shikin, E. V., Boreskov, A. V. (2000), *Computer graphics. Polygonal models [Komp'yuternaja grafika. Poligonal'nye modeli]*, Moscow : DIALOG-MIFI, 464 p.
4. Skorkin, A., Kondratyuk, O. (2017), "The basic principles of the integrated management of the process of assembly and threading", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (2), P. 77–85. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.2.077>.
5. Baranchukova, I. M., Gusev, A. A., Kramarenko, Yu. B. et al. (1999), *Designing Automated Engineering Technology: Proc. for machine building. specialist. universities* / ed. Yu. M. Solomentsev, 2nd ed. M.: Higher. Sc., 416 p.
6. Kormen, T. et al. (2005), *Algorithms. Construction and analysis* / Trans. from English I. V. Krasikova, N. A. Orekhova, V. N. Romashova, 2nd ed., Moscow : Williams, 1290 p.
7. Baldacci, R., Hadjiconstantinou, E., Mingozzi, A. (2004), "An Exact Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem Based on a Two-Commodity Network Flow Formulation", *Operations Research*, Vol. 52, P. 723–738.
8. Wallner, J. (2001), "Smoothness and Self-Intersection of General Offset Surfaces", *Geometry*, Issue 70, P. 176–190.
9. Archetti, C., Hertz, A., Speranza, M. G. (2006), "A tabu search algorithm for the split delivery vehicle routing problem", *Transportation Science*, Vol. 40, P. 64–73.
10. Baldacci, R., Hadjiconstantinou, E., Mingozzi, A. (2004), "An Exact Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem Based on a Two-Commodity Network Flow Formulation", *Operations Research*, Vol. 52, P. 723–738.
11. Barnhill, R.E., Farin, G., Fayard, L., Hagen, H. (1988), "Twists, Curvatures and Surface Interrogation", *Computer Aided Design*, Vol. 20, No. 6, P. 341–346.
12. Beck, J. M., Farouki, R. T., Hinds, J. K. (1986), "Surface Analysis Methods", *EEE Computer Graphis and Application*, Vol. 6, No. 12, P. 18–36.
13. Clarke G., Wright, J. W. (1964), "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points", *Operations Research*, No. 12, P. 568–581.
14. Cohen, E., Lych, T., Schumaker, L. (1986), "Algorithms for degree raising for splines", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 4, No. 3, P. 171–181.
15. Aksen, D., Zyurt, Z., Aras, N. (2006), "Open vehicle routing problem with driver nodes and time deadlines", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 58, Issue 9, P. 255–261.
16. Dill, J. C. (1981), "An Application of Color Graphics to the Display of Surface Curvature", *SIGGRAPH*, P. 153–161.

Надійшла (Received) 28.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Скоркін Антон Олегович – кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри машинобудування та транспорту, Харків, Україна; e-mail: Andromeda862@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3032-8341>.

Скоркин Антон Олегович – кандидат технических наук, доцент, Украинская инженерно-педагогическая академия, доцент кафедры машиностроения и транспорта, Харьков, Украина.

Skorkin Anton – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Associate Professor at the Department of Engineering and Transport, Kharkiv, Ukraine.

Кондратюк Олег Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри машинобудування та транспорту, Харків, Україна; e-mail: kondr20071@i.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3263-0483>.

Кондратюк Олег Леонидович – кандидат технических наук, доцент, Украинская инженерно-педагогическая академия, доцент кафедры машиностроения и транспорта, Харьков, Украина.

Kondratyuk Oleg – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Associate Professor at the Department of Engineering and Transport, Kharkiv, Ukraine.

Старченко Олена Павлівна – Харківський радіотехнічний технікум, заступник директора з навчальної роботи, Харків, Україна; e-mail: Estarchenko79@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7444-6668>.

Старченко Елена Павловна – Харьковский радиотехнический техникум, заместитель директора по учебной работе, Харьков, Украина.

Starchenko Olena – Kharkiv Radio Engineering College, Deputy Director for Academic Affairs, Kharkiv, Ukraine.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ ХОЛОСТЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Предметом исследования в статье является влияние последовательности выполнения переходов на вспомогательное время, затрачиваемое на холостое перемещение станка при изменении обрабатываемого участка и при смене инструмента. **Цель** исследования заключается в повышении производительности процесса чистового фрезерования при обработке деталей сложной формы путем минимизации вспомогательного времени, что позволяет определить оптимальную последовательность выполнения переходов. В статье решаются следующие **задачи**: определение основных подходов в формировании общих стратегий обработки деталей со сложными поверхностями, анализ алгоритмических решений и методов определения лучшего маршрута перемещений инструментов от участка к участку и выгодной последовательности обработки участков сложной поверхности с учетом ограничений по перемещению и стойкости инструмента, разработка математической модели минимизации холостых перемещений при изменении обрабатываемых участков и инструментов на основе точечного описания геометрии детали. Используются следующие **методы**: теоретические и экспериментальные методы исследования, включающие методы системно структурного анализа; методы математической статистики; численные методы высшей математики, теория графов. Получены следующие **результаты**: В результате комплексных теоретических и экспериментальных исследований выявлены методы оптимизации частных и общих стратегий при обработке деталей со сложными поверхностями. Разработан метод определения оптимального маршрута фрез одного типоразмера при движении между группой участков, подлежащих обработке. На основе точечного описания геометрии детали разработана математическая модель минимизации холостых перемещений при изменении обрабатываемых участков. Определены параметры, обеспечивающие минимизацию холостых перемещений при изменении обрабатываемых участков и реализацию алгоритмов расчета длин и положений локальных плоскостей безопасности для последовательно обрабатываемых участков. **Выводы**: Применение подходов в формировании общих стратегий обработки деталей со сложными поверхностями способствует повышению производительности и эффективности использования дорогих многоцелевых станков. Применение данного метода определения лучшего маршрута перемещений инструментов позволяет определить вариант маршрута с минимальным значением вспомогательного времени, затрачиваемого на холостые движения инструментов.

Ключевые слова: ЧПУ; инструмент; фрезерования; проектирование; сложнопрофильные поверхности; чистовая обработка.

THEORETICAL BASES OF OPTIMIZING A TOOL IDLE MOTION WHILE MILLING COMPLEX SURFACES

The subject matter of the article is the impact of the sequence of changes for auxiliary time spent on idle motions of a machine unit when changing a machinable area or when changing tools. The **goal** of the study is to improve the finishing milling capacity when machining geometrically complicated parts by minimizing auxiliary time, which enables determining the optimal sequence of changes. The following **tasks** were solved in the article: the main approaches to developing general strategies for machining geometrically complicated parts were determined; algorithmic solutions and methods for determining the best route for moving tools from site to site were analyzed as well as the advantageous sequence of machining geometrically complicated parts, taking into account motion limitations and constraints for tool life; a mathematical model of minimizing idle motions when changing machinable areas and tools on the basis of the point description of the part geometry. The following **methods** were used: theoretical and experimental research methods including the system and structural analysis; the methods of mathematical statistics; numerical methods of advanced mathematics, the graph theory. The following **results** were obtained. As a result of complex theoretical and experimental studies, methods for optimizing particular and general strategies when machining geometrically complicated parts were identified; a method for determining the optimal route of cutters of the same size when moving within a group of machinable areas was developed; based on the point description of the part geometry, a mathematical model for minimizing idle motions when changing machinable areas was developed; the parameters that minimize the idle motions when changing machinable areas and provide the implementation of algorithms for calculating the lengths and positions of local clearance plane for sequentially machined sections are determined. **Conclusions**. The use of approaches to develop common strategies for machining geometrically complicated parts contributes to an increase in the capacity and efficiency of using expensive multi-purpose machines. The use of this method for determining the best route for moving the tools enables determining the route variant with the minimum value of the auxiliary time spent on idle tool motions.

Keywords: CNC; tool; milling; designing; geometrically complicated parts; finishing treatment.