

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.9.011

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2021.2-9.01>

КОМПЛЕКСНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ВЕРСТАТАХ ІЗ ЧПК

О.В. Глоба¹, С.П. Вислоух², Р.О. Іваненко³

¹к.т.н., доцент,

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4984-7195

²к.т.н., доцент,

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-2204-2602

³старший науковий співробітник,

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-1447-6275

Анотація

У статті розглянуто сутність методу комплексної оптимізації, наводиться алгоритм визначення оптимальної геометрії інструменту, режимів різання і траєкторії руху інструменту. Наводиться експериментальне підтвердження коректності математичної моделі. Стаття присвячена створенню методики автоматизованого розрахунку оптимальних режимів фрезерування криволінійних поверхонь на верстатах із ЧПК з урахуванням різних умов різання, що забезпечують максимальну продуктивність або мінімальну собівартість обробки. Розроблена методика використовується в промисловості у вигляді системи автоматизованого розрахунку оптимальних режимів фрезерування поверхонь кінцевими фрезами. Застосування результатів досліджень дало змогу підвищити продуктивність обробки деталей на фрезерних верстатах із ЧПК, підвищити точність обробки, скоротити час налагодження керуючих програм на верстаті. Метод комплексної оптимізації є оптимальним із позиції витрат часу на обчислення, він дає змогу знайти глобальний екстремум функції на базі спільного використання методів структурної і параметричної оптимізації в процесі вирішення задачі нелінійного програмування. Застосування запропонованого методу комплексної оптимізації процесу кінцевого фрезерування дає змогу отримати оптимальні режими різання з наявних значень на металорізальному верстаті, побудувати оптимальну траєкторію руху різального інструменту в складному геометричному контурі, вибрати оптимальну чорнову і чистову фрезу і їх радіуси заточки. Вибір різального інструмента і визначення оптимального варіанту обробки на

основі мінімізації тривалості процесу обробки за допомогою запропонованого алгоритму, реалізованого на верстатах із ЧПК, дає змогу підвищити загальну продуктивність виготовлення деталі в середньому до 10–15%.

Ключові слова: процес фрезерування, ЧПК, режими різання, геометрія інструменту, траєкторія руху інструмента, математична модель, комплексна оптимізація.

COMPREHENSIVE OPTIMIZATION OF THE MILLING PROCESS ON CNC MACHINES

O.V. Globa¹, S.P. Vysloukh², R.O. Ivanenko³

¹PhD, Associate Professor,

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-4984-7195

²PhD, Associate Professor,

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-2204-2602

³Senior Researcher,

Ukrainian Research Institute of Special Equipment and Forensic Science
of the Security Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-1447-6275

Summary

The article analyzes the essence of the complex optimization method, provides algorithm determining optimal geometry of the tool, cutting modes and tool path. It provides experimental confirmation of the mathematical model correctness. The article focuses on creation of methodology for automated optimal milling mode calculation for curved surfaces on CNC machines, which accounts for different cutting conditions maximizing productivity or minimizing processing cost. Developed technique is used by the industry as automated calculation of the optimal surface milling modes using end mills. Research results application increased productivity of components processing on CNC milling machines, improved processing accuracy, and reduced control programs debugging time. The complex optimization method is optimal from the computations' duration standpoint; it allows finding the global extremum of a function based on the combined use of structural and parametric optimization methods when solving a nonlinear programming problem. Application of the proposed method enables obtaining optimal cutting conditions from available values on a metal-cutting machine, constructing optimal trajectory of the cutting tool in a complex geometric contour, choosing optimal roughing and finishing cutters and their sharpening radii. Use of proposed algorithm to choose cutting tool and determine optimal processing based on minimized processing duration on machines with NPC increases overall manufacturing productivity by 10–15% on average.

Key words: milling process, CNC, cutting modes, tool geometry, tool trajectory, mathematical model, complex optimization.

Вступ. Найважливішим завданням науки про різання металів є встановлення реальних закономірностей основних характеристик процесу їх оброблення залежно від властивостей матеріалу деталі, режимів різання, матеріалу і геометрії різального інструменту та різноманітних зовнішніх умов із метою оптимізації процесу за тими або іншими критеріями оптимальності [7]. Нині мало робіт, в яких розглядаються питання комплексного дослідження процесу фрезерування, особливо в разі оброблення алюмінієвих і титанових сплавів. При цьому оптимізація процесу кінцевого фрезерування виконується на основі застосування детермінованих моделей. Крім того, визначення оптимальних режимів різання реалізується шляхом варіювання не більше, ніж трьома параметрами процесу [1; 4; 6]. Відсутні математичні моделі, що комплексно досліджують основні параметри процесу кінцевого фрезерування і область їх допустимих значень під час оброблення алюмінієвих і титанових сплавів. У більшості робіт з оптимізації оброблення металів різанням в якості оптимізуючих змінних вибираються або режими різання n, s, t , або геометрія різального інструменту, або траєкторія руху інструмента. Але немає робіт, які оптимізують вказані параметри процесу фрезерування одночасно. В отриманні математичних моделей процесу фрезерування не використовуються повною мірою можливості сучасних методів, включаючи методи індуктивної самоорганізації, штучних нейронних мереж тощо [2; 7].

Підвищення продуктивності процесу різання є найважливішим завданням технології механічної оброблення. Незважаючи на існування різних методів формоутворення поверхонь (точне лиття, штампування тощо), найбільш поширеним є механічне оброблення зі зняттям значних припусків. На підставі проведеного аналізу робіт, що пов'язані з питаннями оптимізації технологічних параметрів процесу металообробки деталей, зокрема, процесу кінцевого фрезерування, і відповідно до мети оптимізації, яка полягає в знаходженні вектора змінних параметрів, що доставляють мінімальне (максимальне) значення вибраному критерію оптимальності в області допустимих значень параметрів процесу різання, поставлені задачі дослідження [7].

Формулювання цілей статті. На основі закономірностей появи похибок оброблення, що виникають у процесі фрезерування, можна заздалегідь врахувати їх у керуючій програмі на верстані з ЧПК шляхом зміни траєкторії руху інструменту і обґрунтованим корегуванням режимів обробки, що є додатковим фактором підвищення точності отриманих поверхонь деталі. У зв'язку з цим розробка методики визначення оптимальних режимів різання кінцевими фрезами дає змогу найбільш повно використовувати різальні можливості інструменту з урахуванням необхідної точності обробки з найбільшою продуктивністю, є на сьогодні актуальною задачею. Розробка таких методик ускладнюється неповнотою даних щодо визначення таких важливих параметрів процесу фрезерування, як розмірне зношення інструменту та сила різання.

Існує множина методів параметричної оптимізації процесу фрезерування. Однак вибір того або іншого методу насамперед залежить від математичної моделі, що описує процес фрезерування, включаючи вибір критерію оптимізації і його аналітичну залежність, кількість і вид обмежень, які визначають область допустимих рішень задачі та кількість, у вид оптимізуючих змінних.

Для вирішення задачі оптимізації процесу кінцевого фрезерування поставлені такі основні завдання:

– виконати дослідження процесу кінцевого фрезерування деталей з алюмінієвих і титанових сплавів із використанням змащувально-охолоджувальних рідин і без них із метою отримання математичних залежностей основних параметрів процесу, а саме: сил різання при зустрічному, попутному і пазовому фрезеруванні, шорсткості обробленої поверхні, стійкості різального інструменту тощо;

– створити комплексну математичну модель процесу кінцевого фрезерування на основі розроблених у процесі дослідження математичних залежностей з урахуванням виробничого досвіду, а також із використанням продуктивності в якості цільової функції;

– розробити метод комплексної багатовимірної оптимізації процесу кінцевого фрезерування як у детермінованій, так і в ймовірнісній постановці.

Виклад основного матеріалу. Основним видом інструменту, що призначений для оброблення широкої номенклатури деталей на фрезерних верстатах із ЧПК, є кінцеві фрези. Геометричні параметри фрез вибираються для кожного з позиційних переходів, на які розбивається зона обробки деталі, з урахуванням конструктивно-технологічних параметрів елементарних поверхонь.

Задачі дослідження процесу торцевого фрезерування мають вирішуватись у такій послідовності:

- обґрунтований вибір найбільш ефективного інструментального матеріалу для оброблення деталі із заданого матеріалу;
- вибір раціональної геометрії інструменту;
- вибір мастильно-охолоджувальної рідини;
- визначення оптимальних параметрів процесу різання.

Оптимальне різання, яке характеризується багатьма параметрами (мінімум інтенсивністю зносу, сил різання, коефіцієнтом тертя, максимум розмірної стійкості тощо), краще за все і піддається математичному опису, а також дає найбільшу об'єктивність порівняно з ефективністю різних варіантів процесу обробки.

Запропоновано алгоритм, що дає змогу визначити геометрію різального інструменту (фрези) і вибрати оптимальний варіант обробки в кожній зоні на основі максимальної продуктивності процесу фрезерування [3; 7].

За геометричними параметрами поверхні оброблюваної деталі визначають діаметр чистової фрези, радіус її заточки і довжину різальної частини:

$$D_{\text{чист}} = 2R_{\text{тип}}^{\min}, \quad (1)$$

де $R_{\text{тип}}^{\min}$ – радіус сполучення найменшого кута.

У випадках вимоги підвищеної точності будемо мати

$$D_{\text{чист}} = 1,18R_{\text{тип}}^{\min}. \quad (2)$$

Радіус заточки чистової фрези визначається:

$$r_{\text{тип}}^{\max} : r_{\text{фр.чист.}} = r_{\text{тип}}^{\max}, \quad (3)$$

де $r_{\text{тип}}^{\max}$ – радіус сполучення ребра і площини, фрезерується.

Довжина різальної частини визначається наступним чином:

$l = H + 5$ – для внутрішнього глухого контуру; $l = H + 5 + r_{\text{фр.чист.}}$ – для зовнішнього і внутрішнього наскрізного контуру, де H – максимальна висота стінки деталі.

Діаметр чорнової фрези ($D_{\text{черн}}$) обмежується умовою доступу інструменту у внутрішні гострі кути контуру. При цьому припуск в обробленні внутрішніх кутів не має перевищувати $\delta \leq 0.25D_{\text{чист}}$.

На основі наведеного вище маємо, діаметр чорнової фрези можна обчислити за такою формулою:

$$D_{\text{черн}} = \frac{2(\delta \sin \phi / 2 - \delta_1)}{1 - \sin \phi / 2} + D_{\text{чист}}, \quad (4)$$

де δ_1 – припуск для чистової обробки контуру; ϕ – кут сполучення сторін у цьому контурі.

Радіус заточки чорнової фрези r (рис. 1) визначається за наступним правилом.

Якщо величина радіуса сполучення $r_{\text{тип}}$, який виконується при чистовому обробленні, менше величини припуску в δ_2 або δ_2 , то радіус заточки торця приймається рівним мінімально можливому:

$$\text{якщо } \delta_1 \leq r_{\text{ф.чист}}, \text{ то при } \begin{cases} \delta_1 > r_{\text{мин}} \\ \delta_2 > r_{\text{тип}} \end{cases}, r_{\text{ф}} = r_{\text{тип}} \quad (\text{рис. 1, а}).$$

$$\text{якщо } \begin{cases} \delta_1 < r_{\text{тип}} \\ \delta_2 = 0 \end{cases}, \text{ то } r_{\text{ф}} = r_{\text{тип}} - \delta + 0.1D_{\text{черн}}. \quad (\text{рис. 1, б}).$$

$$\text{якщо } \begin{cases} \delta_1 < r_{\text{мин}} \\ \delta_2 < r_{\text{тип}} \end{cases}, \text{ то } r_{\text{ф}} = 0.5D_{\text{чист}} - (\delta_1 \cdot \delta_2 + \sqrt{2\delta_1 \cdot \delta_2 + 0,1})D_{\text{черн}}. \quad (\text{рис. 1, в}).$$

$$\text{якщо } \delta_1 > r_{\text{ф.чист}}, \text{ то } r_{\text{фр.чист}} = 0 \quad (\text{рис. 1, г}).$$

Довжина різальної частини вибирається за аналогією з чистовою фрезою. Діаметр торцевої частини чорнової фрези визначається за такою залежністю:

$$D_{\text{т.черн}} = D_{\text{черн}} + 2\delta_{\text{ф.черн}} - 2\delta_r^+ + 2\delta_D^-, \quad (5)$$

де δ_r^+ – припуск на виготовлення $r_{\text{ф.черн}}$, δ_D^- – припуск на виготовлення $D_{\text{черн}}$.

Внаслідок того, що в заводських умовах є тільки певні фрези, отже чорнова і чистова фрези вибираються з найбільш придатних за характеристиками значень.

У процесі операції чорнового фрезерування визначення характеристик фрези виконують на основі максимальної продуктивності, яка обчислюється як різниця тривалості періодів технологічної обробки (T_{12}) деталі без використання чорнової фрези (T_1) та з використанням чорнової фрези (T_2). Якщо ця різниця позитивна, то в результаті введення операції чорнової обробки продуктивність підвищується: $T_{12} = T_1 - T_2 > 0$.

Траєкторія руху чорнової фрези визначається проходами, кількість яких залежить від розмірів поверхні. При розрахунку T_1 і T_2 не враховуються однакові витрати. При цьому T_1 визначається як

$$T_1 = \frac{1}{z_1 n_0} \left(\frac{\sum \Sigma \delta_i}{\delta_{z1}} + \frac{\sum L_i}{\delta_{z2}} \right), \quad (6)$$

де δ_{z1} – подача на зуб при обробці площини; δ_{z2} – подача на зуб при обробці перешкод; δ_i – лінії перешкод i -ї площини; δ_i – площа i -ї оброблювальної площини; z – кількість зубів фрези; n_0 – кількість обертів фрези.

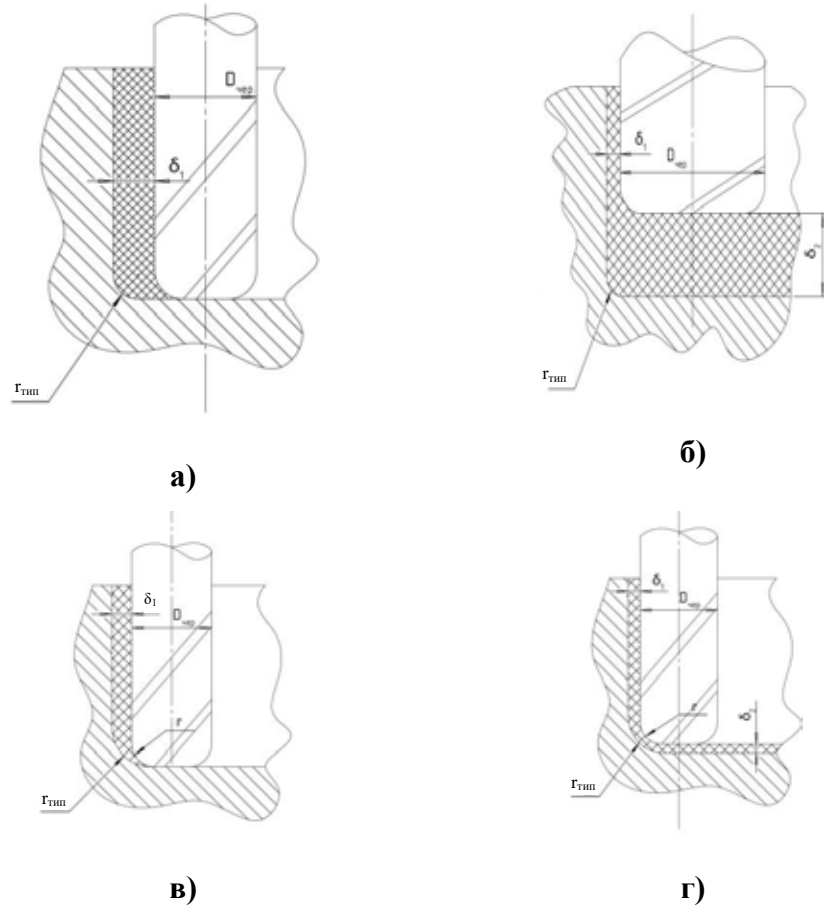


Рис. 1. Схеми визначення геометричних параметрів фрези

T_2 можна визначити, використовуючи залежність:

$$T_2 = \frac{1}{zn_0} \left(\frac{\sum \delta_i}{0.9D_{\text{чери}} S_{z1}} + \frac{\sum \sum \alpha_{ij}}{S_{z1}} + \frac{\sum \alpha_i}{S_{z2}} \right) + T_n, \quad (7)$$

де α_{ij} – довжина переміщення в j -ого куту та i -тої площині чистовою фрезою для вибірки завищеного припуску; T_n – час переустановлення інструменту; α_{ij} – визначається як

$$\delta_{ij} \approx (D_{\text{черн.пр.}} - R_{\text{тип}}) \frac{1 - \sin \varphi_i / 2}{2 \sin \varphi_i / 2} \quad (8)$$

де φ_i – мінімальний кут сполучення стінок.

Якщо запровадження операції чорнової обробки не рентабельне, то згідно з методикою [7] отримують повідомлення про те, що ця операція не потрібна на цій ділянці. У цьому випадку надають тільки параметри чистової фрези та режими її роботи. В іншому випадку необхідні параметри чистової і чорнової фрез із відповідними режимами різання. У табл. 1 наводяться порівняльні варіанти режимів, що існують на виробництві, й отримані на основі запропонованої методики. У табл. 1 наводиться порівняння варіантів існуючого на виробництві технології обробки та отриманого з використанням запропонованої методики. Визначення оптимальних режимів роботи інструменту (кінцевої фрези) є важливою техніко-економічною задачею в галузі приладобудування та машинобудування. Оптимізація процесів оброблення на металорізальних верстатах може бути здійснена тільки на основі вивчення фізичної сутності явищ, які супроводжують процес різання, і знання основних техніко-економічних показників процесу різання.

Задача оптимізації процесу кінцевого фрезерування полягає в знаходженні таких значень оптимізуючих змінних параметрів: подачі, швидкості різання, частоти обертання шпинделя, глибини і ширини фрезерування, при яких забезпечується екстремальне значення цільової функції в області допустимих рішень, що задана низкою технологічних і технічних обмежень [3].

При цьому вибір цільової функції має велике значення, тому що необґрунтоване її призначення може призвести до помилкових висновків і рекомендацій. Правильне визначення цільової функції і обмежень дає змогу побудувати оптимальний спосіб управління операцією технологічного процесу, що своєю чергою дає оптимальний спосіб побудови операцій металообробки, який реалізує алгоритм оптимального технологічного процесу. Після уточнення мети операції переходять до формування математичного виразу критерію оптимальності.

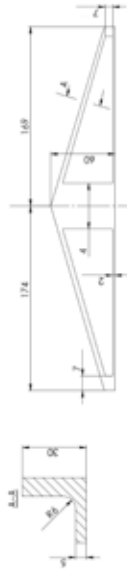
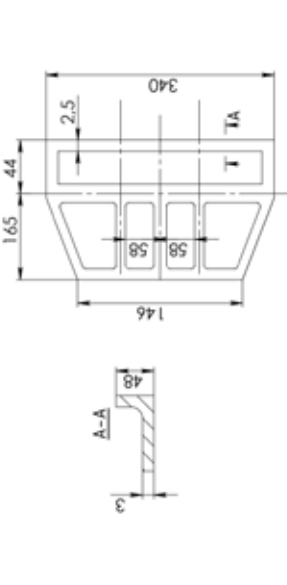
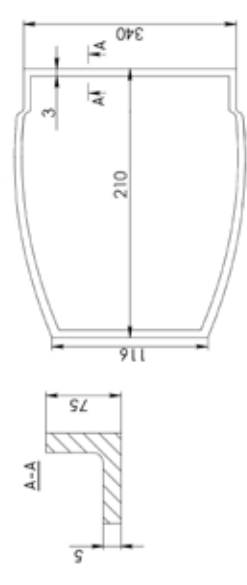
У процесі визначення цільової функції необхідно враховувати основні принципи: однозначності, відповідності, керованості, орієнтації на прибуток, а також принцип відповідної форми.

З урахуванням вищевказаних принципів виконувалась побудова цільової функції. Порівняння двох найбільш часто використовуваних критеріїв продуктивності C_{on} (собівартість) вигідніше застосовувати в обробці на універсальному і недорогому обладнанні. У цьому випадку інтенсифікація режимів різання не призводить до суттєвого підвищення продуктивності обробки. Цільова функція – максимальна продуктивність повною мірою відповідає цілям виробництва, тобто продуктивного оброблення, але в умовах використання неавтоматизованого універсального обладнання дає підвищену вартість обробки. Вплив інтенсифікації режимів обробки на поциклові витрати інструментів та обладнання можна визначити експериментально, тому достовірність рекомендованих режимів залежить, насамперед, від наявного обсягу досліджень продуктивності в конкретних виробничих умовах.

У разі вирішення задач, як цільові функції можуть бути використані залежності, що включають тільки змінні величини для розглянутих випадків (наприклад, неповний штучний час, оперативний або основний час).

Таблиця 1

Порівняння варіантів існуючого на виробництві технології обробки
та отриманого з використанням запропонованої методики

Деталь, Д16	Діаметр фрези		Час обробки до оптимізації хв.	Кількість чорнових переходів	Діаметр фрези		Час обробки після оптимізації хв. числ	Кількість чорнових переходів	Підвищення продуктивності	
	чист	чирн			чист	чирн			Т, хв.	%
	14	30	45	3	14	30	45	3	0	0
		20	30	30	18	20	40	23	12	7
	20	50	23	9	20	60	20	7	3	13

Таким чином, математичним виразом критерію оптимальності може служити функція:

$T_{шт.к.} = T_{шт.к.чист.} + T_{шт.к.черн.}$, яку можна записати у вигляді:

$$T_{шт.к.} = \sum_j \left(\frac{1_j}{S_{mj}} + \frac{L_{кчерн} \cdot T_{зам}}{T_j \cdot S_{Mj}} \right) + \sum_i \left(\frac{1_i}{S_{Mi}} + \frac{L_{кчист} \cdot T_{зам}}{T_i \cdot S_{Mi}} \right) + T_{\Sigma} \rightarrow \min \quad (9)$$

Тоді $T_{шт.к.}$ досягне свого мінімального значення в тому випадку, коли на кожному проході будуть досягнуті мінімальні значення $t_{i \text{ чист}}$

$$t_{i \text{ чист}} \rightarrow \min$$

$$t_{j \text{ черн}} \rightarrow \min$$

З вищенаведеного можна зробити висновок, що задача комплексної оптимізації процесу кінцевого фрезерування розподіляється на низку задач оптимізації, причому очевидною стає необхідність двох етапів комплексної оптимізації, перший з яких дає змогу оптимальним чином поєднати оптимальні значення $t_{i \text{ чист}}$ і $t_{j \text{ черн}}$, що отримані на другому етапі комплексної оптимізації. Фактично такий підхід дає змогу спроектувати оптимальний технологічний процес фрезерної оброблення довільного контуру.

Таким чином, у процесі оброблення довільного контуру кінцевими фрезами досить об'єктивною оцінкою ефективності режимів різання може бути сумарний штучно-калькуляційний час обробки, тому цільову функцію зручно представити у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} \min T_{шт.к.} = \min \sum_j \left(\frac{1_j}{S_{mj}} + \frac{L_{кчерн} T_{зам}}{T_j S_{Mj}} \right) + \min \sum_i \left(\frac{1_i}{S_{Mi}} + \frac{L_{кчист} T_{зам}}{T_i S_{Mi}} \right) + \min T_{\Sigma} \\ \min t_{i \text{ чист}} = \min \left(\frac{1_i}{S_{Mi}} + \frac{L_{кчист} T_{зам}}{T_i S_{Mi}} \right) \\ \min t_{j \text{ черн}} = \min \left(\frac{1_j}{S_{mj}} + \frac{L_{кчерн} T_{зам}}{T_j S_{Mj}} \right) \end{cases} \quad (10)$$

Отже, функція $T_{шт.к.}(n, S_M, D_{черн}, r_{\phi \text{ черн}})$ є цільовою функцією, а значення параметрів $n, S, D_{черн}, r_{\phi}$, що забезпечують мінімум цільової функції за заданих умов, які мають відповідати найбільш ефективним умовам обробки. Тобто необхідно знайти такі чисельні значення параметрів процесу кінцевого фрезерування, які дають змогу з найменшими витратами здійснити обробку деталі і забезпечити задану якість її виготовлення за певний період стійкості різального інструменту. Практичне розв'язання цієї задачі зводиться до $T_{шт.к.} \rightarrow \min$, що залежить від вектора \vec{X} , компонентами якого є: $\vec{X} = \{D, n, S_M, r_{\phi}\}$, що визначають оптимальний технологічний процес обробки довільного контуру, тобто режими різання, траєкторію руху, кількість різального інструменту та його геометрію. Вплив геометричних параметрів фрези діаметра (D) та радіуса заточки (r_{ϕ}) на $T_{шт.к.}$, показано на рис. 2.

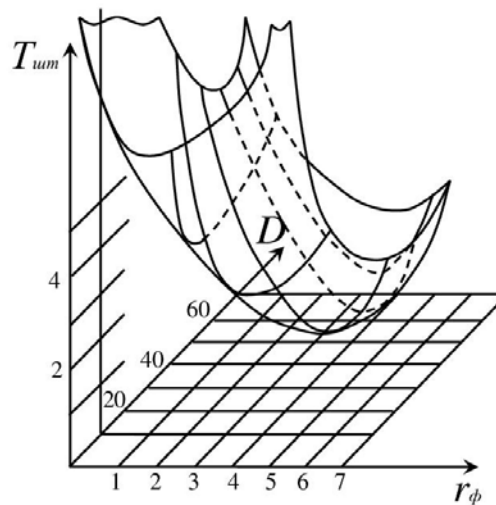


Рис. 2. Графічна залежність сумарного штучно-калькуляційний часу оброблення довільного контуру від діаметра фрези D і радіусу її заточки r_{ϕ}

Цільова функція дає змогу порівнювати окремі варіанти процесу обробки і вибрати такі значення параметрів числового програмного керування, при яких функція залежно від її фізичного змісту приймає максимальне або мінімальне значення. Її вигідніше застосовувати в обробленні на універсальному і недорогому обладнанні. У цьому випадку інтенсифікація режимів різання не призводить до суттєвого підвищення продуктивності обробки. Максимальна продуктивність неповною мірою відповідає меті виробництва, тобто продуктивній обробці, в умовах використання неавтоматизованого універсального обладнання дає підвищену вартість обробки. Але з автоматизованим обладнанням високої вартості, при роботі на якому відхилення від режимів різання, що забезпечує максимальну продуктивність, призводить до недовикористання устаткування за проектною потужністю. У тих випадках, коли потрібно виконати необхідний об'єм робіт у мінімальний час, для оцінки ефективності процесу металообробки і вибору оптимального режиму різання зазвичай використовується критерій максимальної продуктивності, що полягає часто в мінімізації величини штучного часу.

Внаслідок того, що всі параметри процесу металообробки мають випадковий характер, доцільно задачу оптимізації процесу кінцевого фрезерування представити як ймовірнісну, що полягає у визначенні вектора \vec{x} випадкових оптимізуючих змінних x_i , при мінімальному значенні функції. Тому її можна сформулювати таким чином: визначити мінімум функції

$$T_{ум\text{ в}} = a_1 T_{ум}(\vec{x}) + a_2 \left[\sum_i \left(\frac{\partial T_{ум}}{\partial S_{Mi}} / \vec{S}_{Mi} \right)^2 \sigma_{S_{Mi}}^2 + \sum_i \left(\frac{\partial T_{ум}}{\partial T_i} / \vec{T}_i \right)^2 \sigma_{T_i}^2 \right]^{1/2} \rightarrow \min, \quad (11)$$

за умови досягнення мінімального значення величиною штучно-калькуляційного часу обробки на кожному проході.

У ймовірнісній постановці завдання оптимізації процесу кінцевого фрезерування описуваного контуру виглядають таким чином.

Коефіцієнти a_1 та a_2 у формулі (11) приймаються рівними 1 і цільова функція записується як

$$T_{um} = T_{um} + 1,96 \left\{ \sum_j \left[\left(\frac{\partial T_{um}}{\partial t_j} / t_j \right)^2 \sigma_{t_j}^2 + \left(\frac{\partial T_{um}}{\partial T_j} / T_j \right)^2 \sigma_{T_j}^2 \right] \right\}^{1/2} \Rightarrow \min \quad (12)$$

за умови досягнення мінімуму на кожному проході, де a_{1j} та a_{2j} також дорівнюють 1:

$$t_{j\theta} = t_j + 1,96 \left[\left(\frac{\partial t_j}{\partial S_{M_j}} / S_{M_j} \right)^2 \sigma_{S_{M_j}}^2 + \left(\frac{\partial t_j}{\partial T_j} / T_j \right)^2 \sigma_{T_j}^2 \right]^{1/2} \Rightarrow \min \quad (13)$$

Величина середньоквадратичного відхилення періоду стійкості кінцевої фрези визначалася на основі статистичного аналізу експериментальних даних і дорівнює $\sigma_T = 19,6$, величина середньоквадратичного відхилення t_j визначається наступним чином

$$\sigma_{t_j}^2 = \left(\frac{\partial t_j}{\partial S_{M_j}} \right)^2 \sigma_{S_{M_j}}^2, \quad (14)$$

$$\sigma_{t_j} = \frac{\partial t_j}{\partial S_{M_j}} \sigma_{S_{M_j}}$$

та $\sigma_{S_{M_j}}$ – визначається на основі статистичного аналізу виробничих даних $\sigma_{S_{M_j}} = 7,3 \text{ мм/х}$.

Також для оптимізації процесу фрезерування кінцевими фрезами досліджувалась траєкторія руху інструменту [7]. Як технологічний принцип побудови траєкторії руху вибрана умова, згідно з якою фреза переміщається еквідистантно до траєкторії проходу, призначеного для обробки контуру виступу, до обмеження площини. Виконання цієї умови забезпечує рівномірну зміну жорсткості деталі в процесі обробки. Вибір і оптимізація траєкторії руху в роботі виконувалась у такий спосіб: у довільний контур вписуються еквідистантно проходи чорнкової фрези до тих пір, поки не буде повністю вибрано припуск у контурі деталі, тобто прохід у центрі контуру стане рівним або менше $D_{чери}$. Блок-схема вибору оптимальної траєкторії руху фрези показана на рис. 3.

Висновки. Запропонований метод комплексної оптимізації для визначення оптимальних технологічних параметрів процесу кінцевого фрезерування дає змогу за вихідними даними про процес обробки отримати параметри, що дають найменше значення встановленому критерію оптимальності.

Метод комплексної оптимізації ґрунтується на простих методах вирішення оптимізаційних задач нелінійного програмування за наявності обмежень, його застосування та є більш ефективним. У процесі вирішення завдання комплексної оптимізації обчислювальні процеси оптимізації протікають на двох рівнях, що взаємодіють в ітераційному режимі, де зовнішнім циклом ітерації є перший етап оптимізації, а внутрішнім циклом – другий. Метод комплексної оптимізації має гарну збіжність і стосовно завдань оптимізації процесу кінцевого фрезерування показує високу ефективність. Застосування запропонованого методу комплексної

оптимізації процесу кінцевого фрезерування дає змогу отримати оптимальні режими різання з наявних значень на верстаті, побудувати оптимальну траєкторію руху різального інструменту в складному геометричному контурі, вибрати оптимальну чорнову і чистову фрезу і їх радіуси заточки.

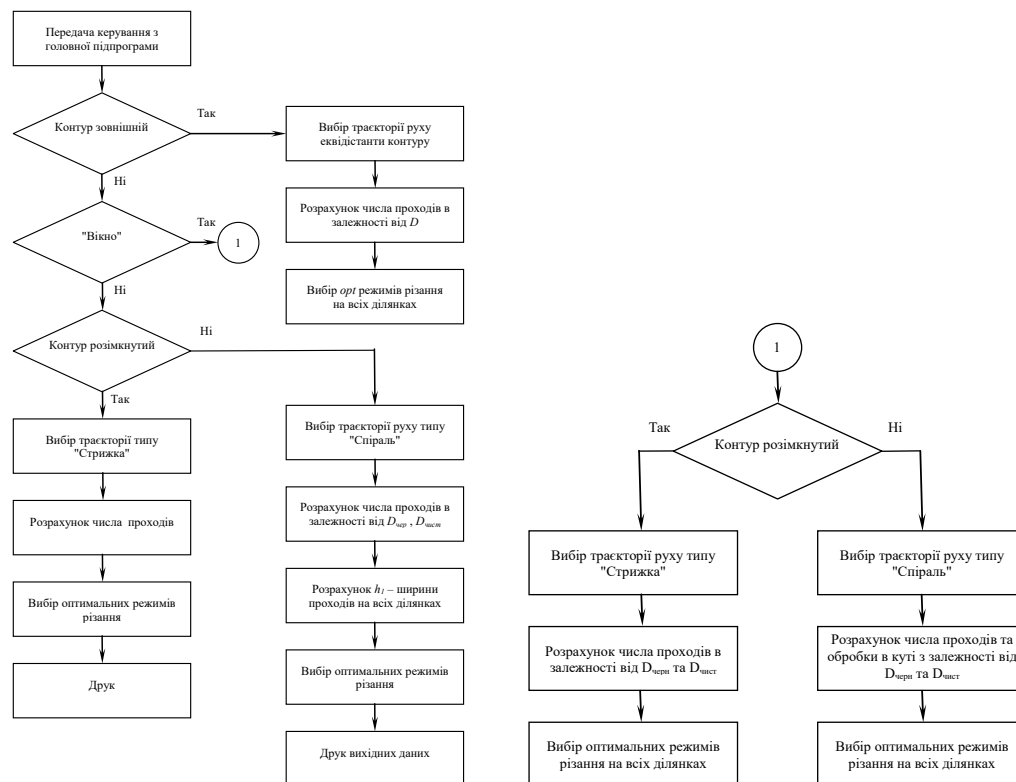


Рис. 3. Блок-схема вибору оптимальної траєкторії руху фрези

Отже, можна зробити висновок, що вибір різального інструменту і визначення оптимального варіанту обробки на основі мінімізації тривалості процесу обробки за допомогою запропонованого алгоритму, реалізованого на верстатах із ЧПК, дає змогу підвищити загальну продуктивність виготовлення деталі в середньому до 10–15%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Остафьев В.А., Выслоух С.П., Антонюк В.С. Оптимизация обработки лезвийным инструментом. *Современные пути повышения производительности и точности металлообрабатывающего оборудования технологических процессов в машиностроении* : сборник. Москва : Изд. ЦИНТО МАШПРОМ, 1980. С. 78–82.
2. Остафьев В.А., Усачев П.А., Выслоух С.П. Прочность и износостойкость режущего инструмента. Киев : Знание, 1978.

3. Машиностроение. Энциклопедия. Технология изготовления деталей машин Т. III-3 / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др.; под общ. ред. А.Г. Сулова. Москва : М38 Машиностроение, 2000. 840 с.
4. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Системы числового программного управления : учеб. пособие. Москва : Логос, 2005. С. 296.
5. Фельдштейн Э.И. Обрабатываемость сталей. Москва : Машгиз, 1953. 255 с.
6. Радченко С.Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем : навч.-метод. посіб. Київ : ІВЦ «Політехніка», 2001. 88 с.
7. Вислоух С.П. Інформаційні технології в задачах технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва : монографія. Київ: НТУУ „КПІ”, 2011. 480 с.

REFERENCES

1. Ostafyev V.A., Vyzloukh S.P., Antonyuk V.S. Optimization of blade tool processing. Sat. “Modern ways to increase the productivity and accuracy of metalworking equipment of technological processes in mechanical engineering”, Ed. CINTO MASHPROM, Moscow, 1980. Page 78–82.
2. Ostafiev V.A., Usachev P.A., Vyzloukh S.P. Strength and wear resistance of the cutting tool, K.: Knowledge, 1978.
3. Mechanical engineering. Encyclopedia. Machine parts manufacturing technology Т. III-3 / А.М. Dalsky, А.Г. Suslov, Yu.F. Nazarov and others; Under the general ed. А.Г. Suslova. М.: М38 Engineering, 2000. 840 s., il.
4. Sosonkin V.L., Martinov G.M. Numerical software control systems: Textbook. M.: Logos, 2005. P. 296.
6. Radchenko S.H. Matematychnе modeliuvannia ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system: Navch.-metod. posib. K.: IVTs „Politekhnikа”, 2001. 88 s.
7. Vysloukh S.P. Informatsiini tekhnolohii v zadachakh tekhnolohichnoi pidhotovky prylado- ta mashynobudivnoho vyrobnytstva: Monohrafiia. K.: NTUU „KPI”, 2011. 480 s.