

А.П.Тарасюк, д-р техн. наук,
О.Л. Кондратюк, канд. техн. наук, Харків, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАЄКТОРІЙ РУХУ ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ОБРОБЦІ ПОВЕРХНІ ПЕРА ЛОПАТОК ПАРОВИХ ТУРБІН

Розглядається можливість застосування багатоінструментальних верстатів зі ЧПК для пророблення всього комплексу поверхонь пера лопаток з одного установов. Здійснена оптимізація вибору траєкторії обробки фрезеруванням за критерієм мінімуму трудомісткості. Даний тип фрезерування пера лопатки є самим продуктивним і застосовується на плоских не закручених лопатках і при чорновій обробці.

Рассматривается возможность применения многоинструментальных станков с ЧПУ для проработки всего комплекса поверхностей пера лопаток с одной установкой. Осуществлена оптимизация выбора траектории обработки фрезерованием по критерию минимума трудоемкости. Данный тип фрезерования пера лопатки является самым производительным и применяется на плоских не закрученных лопатках и при черновой обработке.

The possibility of mnogoinstrumentalnih CNC machines for the study of complex surfaces pen blades with one institution. Carried out optimization of the choice of milling toolpaths on the criterion of minimum complexity. This type of milling of the blade is the most productive and is used on flat and not twisted blades for roughing

Вступ

Однієї із проблем механічної обробки комплексу поверхонь пера турбінних лопаток на верстатах із числовим програмним керуванням визначення оптимальних траєкторій переміщення різального інструменту, розмірів і форми. При цьому кількість різальних інструментів, послідовно обробляють різні елементи поверхні пера, повинне бути мінімальним. Поява подібного завдання пов'язане з тим, що трактова поверхня пера лопатки являє собою єдиний комплекс різних поверхонь, що плавно сполучаються між собою. У цей комплекс входять опуклі й увігнуті поверхні різної кривизни й довжини (спинка, корито пера, крайки, сполучення пера із хвостовиком і полками). Традиційно технологія механічної обробки таких поверхонь будувалася на роздільній обробці спинки і корита, крайок, ділянок сполучення пера з полками і хвостовиком [1]. Перевага такої обробки - більша продуктивність, недолік - низька точність формоутворення через переустановлення лопаток з верстата на верстат, і жолоблення заготівель у процесі "пролеживання" між операціями і в процесі обробки від зусилля різання. Виключити ці факториповністю практично неможливо [2].

Класифікація існуючих методів досліджень

Великий внесок у розвиток теорії і практики механічної обробки підвищення довговічності лопаток турбін внесли вчені Військової Повітряної Інженерної Академії ім. Н.Е. Жуковського (ВВИА ім. Н.Е. Жуковського), Мос-

ковського Державного Технічного Університету ім. Н.Е. Баумана (МГТУ ім. Н.Е. Баумана).

Дослідження процесу

Розглянемо можливість застосування багатоінструментальних верстатів зі ЧПК для обробки всього комплексу поверхонь із одного установа. Нехай є деталь, форма якої описується складною замкнутою поверхнею, представленої безліччю базових крапок:

$$B = \left\{ (x_k, y_k, z_k) \mid k = \overline{1, N} \right\}, \quad (1)$$

де x_k, y_k, z_k – координати k -й крапки поверхні; N – число базових крапок, що визначають оброблювану поверхню.

Будемо вважати, що в складі розглянутої поверхні виділені окремі частини (ділянки), обумовлені підмножинами базових крапок $B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_p$, де довільний j -й ділянка описується N_j крапками, що становлять безліч B_j :

$$B = \left\{ (x_k, y_k, z_k) \mid k = \overline{1, N_j}, j = \overline{1, p} \right\}. \quad (2)$$

При цьому $\sum_{j=1}^p N_j = N$.

Виготовлення розглянутої деталі здійснюється на верстаті зі ЧПК, оснащеному m інструментами. Кожний з наявних інструментів може обробляти певну підмножину ділянок поверхні деталі.

Можливі варіанти розподілу інструментів при обробці поверхні деталі будемо описувати матрицею

$$R = \left[r_{ij} \right]_{m \times p}, \quad (3)$$

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i\text{-м інструментом можливо проводити} \\ & \text{обробку } j\text{-й ділянки поверхні;} \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases}$$

Відзначимо, що матриця (3) будується на основі попереднього аналізу технології виготовлення розглянутої деталі. Обробка i -м інструментом j -ї ділянки може здійснюватися з використанням різних траєкторій його руху.

Будемо вважати, що для двох довільних крапок ($s \in B_j$ і $l \in B_j$), обумовлених координатами (x_s, y_s, z_s) і (x_l, y_l, z_l) , допускаються переміщення i -го інструмента як від крапки s у крапку l , так і в протилежному напрямку.

Будемо описувати кожний j -й ділянка поверхні неорієнтованим графом G_j , ребрами якого є всілякі відрізки, що з'єднують будь-які пари базових крапок $s \in B_j$ і $l \in \overline{B_j}$, $j = \overline{1, p}$. Такий граф звється повного [3].

Рух i -го інструмента по ребру $(s, l) \in G_j$ характеризується наступними параметрами: $t_{sl}^{(i)}$ – час обробки відрізка (s, l) ; $\sigma_{sl}^{(i)}$ – кінематична погрішність обробки поверхні між крапками з координатами (x_s, y_s, z_s) і (x_l, y_l, z_l) .

При виборі інструмента для обробки j -ої ділянки траєкторії його руху будемо враховувати наступні вимоги:

1) траєкторія руху інструмента повинна пройти через всі базові крапки B_j оброблюваної ділянки, від початкової крапки $s_{нач} \in B_j$ до кінцевої крапки $s_{кон} \in B_j$;

2) розрахункова кінематична погрішність обробки кожної ділянки не повинна перевищувати заданої;

3) вибір інструмента виробляється із заданої безлічі інструментів;

4) сумарний час обробки повинне бути мінімальним.

При побудові математичної моделі оптимізації вибору виду інструментів і траєкторій їхнього руху будемо використовувати формальну постановку завдання про комівояжера [4], доробивши її зобліком другої та третьої вимог.

Будемо вважати, що для обробки j -ої ділянки використовується інструмент i -го виду. Уведемо в графі G_j фіктивні ребра $(0, s_{поч})$ і $(l_{кон}, 0)$, що з'єднують фіктивну вершину «0» з початковою й кінцевою крапками розглянутої ділянки.

Для побудови оптимальної траєкторії обробки ділянки i -м інструментом уведемо в розгляд "булевские" змінні:

$$\xi_{sl}^{(i)} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i\text{-й інструмент повинен переміщатися} \\ & \text{від крапки } s \in B_j \text{ до крапки } l \in B_j; \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases}$$

На ці змінні повинні бути накладені обмеження

$$\xi_{sl}^{(i)} \in \{0, 1\}, \quad s, l = \overline{0, N_j}, \quad (4)$$

З урахуванням цих обмежень умова, що i -й інструмент один раз входить у процесі обробки в кожну базову крапку ділянки, записується в такий спосіб:

$$\sum_{s=0}^{N_j} \xi_{sl}^{(i)} = 1, \quad l = \overline{0, N_j}. \quad (5)$$

Аналогічно можна записати умови, що інструмент у процесі обробки

один раз виходить із кожної крапки:

$$\sum_{s=0}^{N_j} \xi_{sl}^{(i)} = 1, \quad s = \overline{0, N_j}. \quad (6)$$

У процесі обходу i -м інструментом всіх N_j базових крапок повинна вийти замкнута траєкторія, що починається й закінчується у фіктивній крапці «0». У теорії графів [3] і технології машинобудування [5] такий маршрут називається циклом.

Нехай $u_s^{(i)}$ і $u_l^{(i)}$ – додаткові змінні, які можуть приймати речовинні значення:

$$-\infty < u_s^{(i)} < \infty, \quad s = \overline{0, N_j}; \quad -\infty < u_l^{(i)} < \infty, \quad l = \overline{0, N_j}. \quad (7)$$

Тоді, впливаючи роботі [4], умови відсутності в траєкторії руху i -го інструмента підциклів [3] можливо записати як

$$u_s^{(i)} - u_l^{(i)} + N_j \xi_{sl}^{(i)} \leq N_j - 1, \quad s, l = \overline{0, N_j}, \quad s \neq l. \quad (8)$$

Вибір виду інструмента для обробки j -го ділянки будемо здійснювати за допомогою «булевских» змінних:

$$\eta_{ij} = \begin{cases} \text{Використовується різного виду} \\ 1, \text{ якщо для обробки } j\text{-й ділянки} \\ \text{використовується } i\text{-го виду;} \\ 0, \text{ у протилежному випадку.} \end{cases}$$

Обмеження на ці змінні записуються як

$$\eta_{ji} \in \{0; 1\}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, p}. \quad (9)$$

Умови, що для обробки кожної ділянки використовується тільки один вид інструмента, можна представити рівністю

$$\sum_{i=1}^m \eta_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, p}. \quad (10)$$

Нехай у технології обробки деталі задані необхідні значення точності обробки $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_p$ на кожній з ділянок. Тоді умови забезпечення заданих вимог по точності обробки деталі можна представити як

$$\max_{(sl) \in G_j} \left\{ \sum_{i=1}^m \delta_{sl}^{(i)} \xi_{sl}^{(i)} \eta_{ji} \right\} \leq \Delta_j, \quad j = \overline{1, p}, \quad (11)$$

де $\delta_{sl}^{(i)}$ – погрішність обробки при русі i -го інструмента з s -ї крапки в l -ю крапку поверхні.

Витрати часу на обробку j -ої ділянки при виборі виду застосовуваного інструмента й траєкторії його руху можна визначити вираженням

$$T_j = \sum_{i=1}^m \sum_{s=0}^{N_j} \sum_{l=0}^{N_j} r_{ij} t_{sl}^{(i)} \xi_{sl}^{(i)} \eta_{ji},$$

де r_{ij} – елементи матриці R ; $t_{sl}^{(i)}$ – час проходження i -го інструмента з s -ї крапки в l -ю крапку траєкторії.

Загальні витрати часу на виготовлення розглянутої деталі з урахуванням цього вираження запишуться як

$$T = \sum_{j=1}^p T_j = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^m \sum_{s=0}^{N_j} \sum_{l=0}^{N_j} r_{ij} t_{sl}^{(i)} \xi_{sl}^{(i)} \eta_{ji} \rightarrow \min. \quad (12)$$

Таким чином, розв'язування завдання оптимізації формулюється в такий спосіб: знайти значення змінних $\xi_{sl}^{(i)}$, $s, l = \overline{0, N_j}$, що доставляють мінімум цільової функції (12), для заданих змінних η_{ji} , $j = \overline{1, p}$, $i = \overline{1, m}$, при виконанні умов (4) – (11).

Вид цільової функції й обмежень сформульованого завдання показує, що вона ставиться до класу завдань нелінійного дискретнонеперісного програмування [6] великої розмірності через значне число базових крапок $N_1, N_2, \dots, N_p$. Рішення таких завдань за прийнятний час можливо за допомогою генетичних алгоритмів [7].

Розглянемо запропонований метод на прикладі рішення завдання оптимізації траєкторії руху вибору інструмента при фрезеруванні лопатки п'ято-гощаблия компресора низького тиску. Фрезерування здійснюється на верстаті ОЦЗіЧПУ NX-155 фірми «Starrag» з наступними характеристиками:

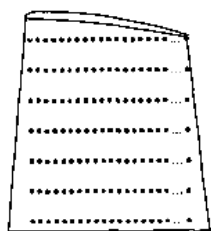
- контурне числове програмне забезпечення;
- максимальна довжина оброблюваної лопатки 700 мм;
- значення робочих переміщень по осях, подачі й прискореного ходу приведені в таблиці. 1.

Траєкторія розроблялася для крапки контакту інструмента з поверхнею деталі. При обробці деталей центр інструмента рухається по еквідистанте до поверхні деталі, що складає з опорних крапок і елементарних ділянок між сусідніми опорними крапками. Профіль пера й трактова поверхня полки хвостовика лопатки задаються відповідно до конструкторського креслення набором крапок поверхні, що представляють собою множина (1) базових крапок B .

Таблиця 1 – Значення робочих переміщень по осях

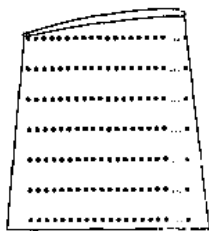
Назва переміщення	Максимальне значення
Переміщення	
Поздовжнє X , мм	1500
Поперечнє Z , мм	400
Вертикальне Y , мм	400
В кругову A , град.	не обмежено
Поворот B , град.	± 40
Подачі	
Паралельно осям X, Y, Z , мм/хв	2500
Кругова A , об/хв	20
Поворот B , об/хв	3,4
Прискорений хід	
Поздовжній X , поперечний Z , мм/хв	8000
Вертикальний Y , мм/хв	4000
Кругова A , об/хв	20
Поворот B , об/хв	3,4

Поверхня даної лопатки можна розбити на наступні ділянки, обумовлені підмножиною базових крапок спинки пера B_1 (рисунок 1, а), підмножиною базових крапок корита пера B_2 (рисунок 1, б), підмножиною базових крапок вхідної крайки B_3 (рисунок 2, а), підмножиною базових крапок вихідної крайки B_4 (рисунок 2, б), підмножиною базових крапок трактової поверхні полки хвостовика B_5 (рисунок 3), підмножиною базових крапок ділянки сполучення B_6 (рисунок 4).



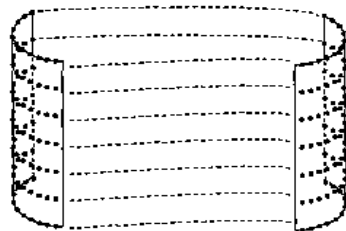
а)

Рисунок 1 – Підмножина базових крапок: а - спинки пера B_1 ; б - корита пера



б)

B_2



а)

Рисунок 2 – Підмножина базових крапок: а – вхідної кромки B_3 ; б - вихідної кромки B_4

б)

Кожна підмножина B_1 і B_2 має по 231 крапки, які задані по рядках координатами X_k, Y_k, Z_k у просторі. Підмножини B_3 і B_4 задані набором 7 координат

центрів окружностей і радіусів вхідної й вихідної крайок для кожного рядка з координатами Z_k .

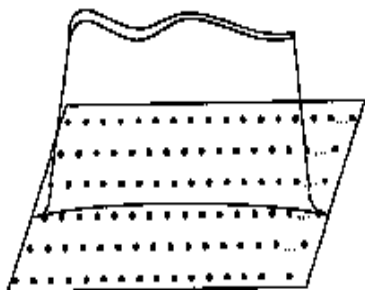


Рисунок 3 – Підмножина базових крапоктрактової поверхні полиці хвостовика B_5

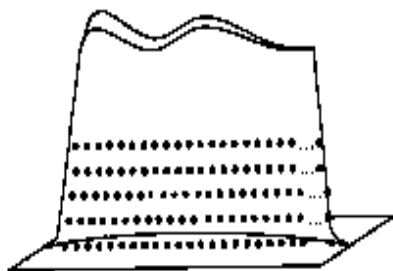


Рисунок 4 – Підмножина базових крапокділянки сполучення B_6

Безлічі базових крапок підмножин B_3 і B_4 одержуємо по наступних формулах:

$$X_{ij} = r_{ij} \cos \varphi_{ij}; Y_{ij} = r_{ij} \sin \varphi_{ij}; Z_{ij} = Z_j,$$

де r_j – радіус окружності крайки в j -м перетині; φ_{ij} – кутова координата i -й крапки окружності крайки в j -м перетині; Z_j – координата j -го перетину.

Таким чином, безлічі крапок вхідний і вихідний крайок мають вигляд

$$B_3 = \bigcup_{\substack{i=1 \dots n_1 \\ j=1 \dots n}} \{X_{ij}^{ax}, Y_{ij}^{ax}, Z_{ij}^{ax}\}; \quad B_4 = \bigcup_{\substack{i=1 \dots n_2 \\ j=1 \dots n}} \{X_{ij}^{bых}, Y_{ij}^{bых}, Z_{ij}^{bых}\},$$

де n – кількість перетинів; n_1 і n_2 – кількість крапок окружності вхідної й вихідної крайок, необхідних для обробки із заданою точністю й необхідною якістю поверхні.

Покладемо, що кожний j -ая ділянка поверхні лопатки обробляється окремим інструментом (зобліком, що спинка пера лопатки може бути оброблена одним інструментом, корито – іншим, вхідна крайка обробляється третім інструментом, а вихідна – четвертим). Таким чином, для обробки всієї поверхні лопатки необхідно максимум 4 інструменти. При цьому можливо скорочення кількості інструментів, якщо обробляти спинку й корито одним інструментом, а вхідну й вихідну крайки – іншим. П'ятишпиндельний верстат NX-155 дозволяє здійснити зміну інструментів у процесі обробки без зупинки верстата. Технологічним процесом визначені інструменти для обробки лопатки: на першій і другій ділянках – фреза $R32$, $z = 4$; на третій, четвертій і п'ятій ділянках – фреза $R5$, $z = 4$; на шостій ділянці – фреза $R3$, $z = 4$. Зобліком цього можна сформувати матрицю $R_{4 \times 6}$:

$$R = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix}. \quad (13)$$

Подача i -го інструмента уздовж траєкторії, що забезпечує задану стійкість інструмента, вибирається в кожній крапці з технологічних міркувань. Матриця подач $\{S_{sl}^{(i)}\}$ може бути задана заздалегідь або визначатися в кожній крапці по формулах. Набір подач для обробки лопатки п'ятому ступені зазначений у таблиці 2.

Таблиця 2 – Набір подач для обробки лопатки п'ятому ступені зазначений

Номер ділянки	Напрямок обробки	
	Поперекпера	Уздовж пера
1	320	350
2	300	320
3	200	250
4	200	250
5	382	382
6	75	75

Відстань між сусідніми крапками траєкторії руху інструмента визначається по формулі

$$L_{sl} = \sqrt{(X_s - X_l)^2 + (Y_s - Y_l)^2 + (Z_s - Z_l)^2}.$$

Тоді час проходження i -го інструмента з s -й крапки в l -ю можна визначити по формулі

$$t_{sl}^{(i)} = \frac{L_{sl}}{S_{sl}^{(i)}} = \frac{\sqrt{(X_s - X_l)^2 + (Y_s - Y_l)^2 + (Z_s - Z_l)^2}}{S_{sl}^{(i)}}. \quad (14)$$

Таким чином, цільова функція (12) має наступні значення параметрів:

$$p = 6; m = 4; N_1 = 231; N_2 = 231; N_3 = 7 n_{i1}; N_4 = 7 n_{i2};$$

r_{ij} – елементи матриці (13); $t_{sl}^{(i)}$ – обчислюються по формулі (14).

Формування множин B_1 і B_2 здійснюється шляхом потрібного перекладу системи координат: із системи $X_N O_N Y_N$, у якій задані координати крапок кожного профільного перетину конструкторським кресленням, у систему верстака XOY (рисунок. 5).

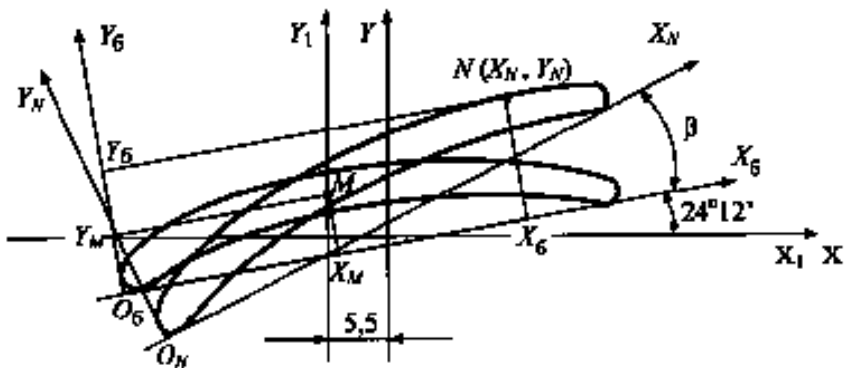


Рисунок 5 – Переклад системи координат із системи $X_N O_N Y_N$ в систему верстата XOY

Координати крапки $N(X_N, Y_N)$ профільних перетинів задані в кресленні в системі $X_N O_N Y_N$, поверненої щодо системи першого перетину $X_6 O_6 Y_6$ навколо центра мас – крапки M – на кут β . Крапка M задана в системі $X_6 O_6 Y_6$ координатами (X_M, Y_M) .

Координати крапки O_N у системі $X_6 O_6 Y_6$ визначаються по наступних формулах:

$$\begin{aligned} X_{O_N} &= X_M + \sqrt{X_M^2 + Y_M^2} \cos \alpha; \\ Y_{O_N} &= Y_M + \sqrt{X_M^2 + Y_M^2} \sin \alpha, \end{aligned} \quad (15)$$

де

$$\alpha = \beta + \pi + \arctg Y_M / X_M$$

Тоді крапка N профільного перетину в системі $X_6 O_6 Y_6$ має наступні координати:

$$\begin{aligned} X_6 &= X_{O_N} + X_N \cos \beta - Y_N \sin \beta; \\ Y_6 &= Y_{O_N} + X_N \sin \beta + Y_N \cos \beta. \end{aligned} \quad (16)$$

Звідси координати крапки N у системі XOY :

$$\begin{aligned} X &= (X_{\delta} - X_M) \cos(-24, 2^{\circ}) + (Y_{\delta} - Y_M) \sin(24, 2^{\circ}) - 5, 5; \\ Y &= -(X_{\delta} - X_M) \sin(-24, 2^{\circ}) + (Y_{\delta} - Y_M) \cos(-24, 2^{\circ}). \end{aligned} \quad (17)$$

Масив координат крапок, отриманих по формулі (17), є базовим для виконання алгоритму пошуку оптимальної траєкторії руху інструмента за критерієм мінімуму трудомісткості. Для цього використаний евристичний метод.

1. Інструмент підводить до початкової крапки $x_{\text{поч}}$ першої ділянки B_1 .

Причому в якості початкової може бути обрана будь-яка технологічно обґрунтована крапка оброблюваної поверхні.

2. У даній крапці будується тринадцять напрямків (рисунк 6). Плошке її зображення не означає, що інструмент буде переміщатися в площині XOZ . У кожному з восьми напрямків визначається третя координата з умови, що отримана крапка належить оброблюваній поверхні. У кожній з восьми крапок визначається трудомісткість по формулі (14). Вибирається напрямок, що відповідає найменшій трудомісткості.

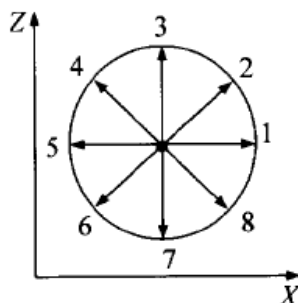


Рисунок 6 – Роза напрямків

3. В обраному напрямку здійснюється обробка певним інструментом з певним значенням подачі і визначається погрішність обробки на даній ділянці. Якщо погрішність перевищує задану точність, то даний напрямок відкидається вибирається інше, зледве більшою трудомісткістю.

4. Обробка вважається закінченою, коли інструмент обійде всі базові крапки поверхні.

По описаному алгоритмі була складена програма та зроблено розрахунок траєкторії обробки пера лопатки п'ятого щабля компресора низького тиску газотурбінного двигуна. Результат розрахунку (траєкторія руху інструмента, що забезпечує мінімум трудомісткості при обробці пера лопатки) схематично показаний на рисунку 7.

У процесі розрахунку на печатку видаються номер крапки, її координати в системі верстата, значення подачі, номер ділянки, якому належить дана крапка, номер інструмента й накопичене значення трудомісткості. Трудомісткість обробки обраного маршруту склала 6,2 хвилин.

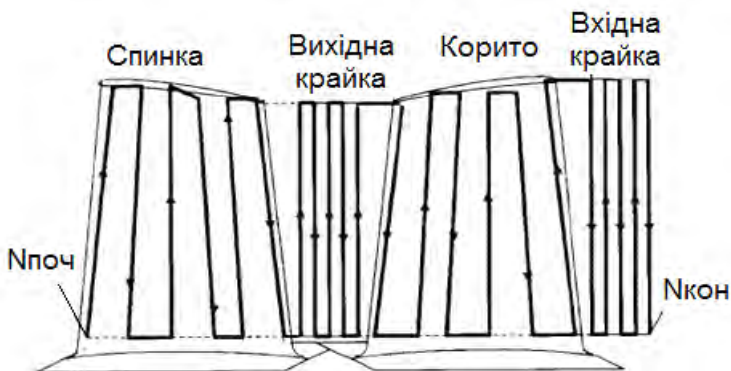


Рисунок 7 – Траєкторія руху інструмента, що забезпечує мінімум трудомісткості при обробці пера лопатки

Висновки

Даний тип фрезерування пера лопатки є самим продуктивним і застосовується на плоских не закручених лопатках і при чорновому фрезеруванні. Такий тип фрезерування використовує фірма «Starrag» для обробки крайок.

Однак якщо взяти до уваги точність обробленої поверхні, те найбільш оптимальним буде обробка спіральним способом або уздовж профільних перетинів. Для порівняння був зроблений розрахунок трудомісткості обробки уздовж профільних перетинів. Для цього маршруту вона склала 8,49 хвилин.

Список використаних джерел: 1.Братухин А.Г., Халимуллин Р.М., Юнусов Ф.С. и др. Размерное и безразмерноеформообразованиеповерхностей деталей. М.: Машиностроение, 1996. 272 с. 2.Тунев А.Н., Моисеева Л.Т., Юнусов Ф.С. Адаптивноеформообразование лопаток шлифованием. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2002. 135 с. 3.Берж К. Теорияграфов и ее применение. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 346 с. 4. Кузин Л.Т. Основы кибернетики. Математические основы кибернетики. М.: Энергия, 1973. Т. 1. 504 с. 5.Справочник технологамашиностроителя: в 2 т. / Под ред. А.Г. Касимовой и Р.К. Мецеракова. М.:Машиностроение, 1986. Т. 1. 6.Таха Х. Введение в исследованиеопераций: в 2 кн. М.: Мир, 1985. Кн. 2. 496 с. 7.Вороновский Г.К., Махотило К.В., Петрашев С.Н., Сергеев С.А. Генетическиеалгоритмы, искусственныенейронные сети и проблемы виртуальнойреальности. Харьков: Основа, 1997. 112 с.

Надійшла до редакції 10.06.2012