

УДК 621.9.015

**Ю.В. Петраков, д.т.н., проф.****Н.В. Гуріна, магістр***Національний технічний університет України "КПІ"***ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РІЗАННЯ  
ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ**

*Представлена нова прикладна програма оптимізації режиму різання при торцевому фрезеруванні, що базується на розробленій математичній моделі процесу, яка вперше враховує залежність шорсткості оброблення від взаємного розташування фрези і заготовки і використовує методику нелінійного програмування. Прикладна програма може також використовуватись при підготовці фахівців з технології машинобудування.*

Торцеве фрезерування є найбільш розповсюдженим процесом обробки плоских поверхонь деталей машин. У сучасному виробництві для виконання таких технологічних операцій використовують верстати з ЧПУ, а технологічну підготовку виробництва здійснюють за допомогою прикладних пакетів САМ-систем. Такі системи проєктують необхідні траєкторії формують рухів, різні технологічні команди і виконують підготовку програми у кодах постпроцесора відповідного верстата із забезпеченням перевірки виконання програми за рахунок візуалізації процесу на екрані монітора комп'ютера. Однак, незважаючи на значну допомогу технологу при вирішенні завдань підготовки виробництва, такі системи, як правило, не встановлюють режим різання, а у кращому випадку надають можливість вибору з існуючої бази даних так званим «табличним» методом. Такі методи розраховані на використання універсальних фрезерних верстатів, тобто адаптовані до існуючих рядів подач і частот обертання шпинделя, тоді як верстати з ЧПУ зазвичай мають безперервний діапазон управління. В результаті призначення у більшості випадків з досвіду працівника режим різання виявляється далеким від оптимального, що значно погіршує виробничі показники.

Задача оптимізації режиму торцевого фрезерування може бути сформульована наступним чином: знайти такі невід'ємні значення управління – повздовжньої подачі  $s$  та частоти  $n$  обертання шпинделя, – які задовольняють всім обмеженням за якістю і обумовлюють мінімум критерію оптимальності технологічному часу  $t_0$ . Таким чином, задача оптимізації процесу у такій постановці належить до класичних задач нелінійного програмування, що не мають принципівих труднощів у розв'язанні. Проте визначення системи обмежень та створення дійового, надійного і простого у використанні інструменту вирішення становлять досить актуальну задачу сучасного машинобудівного виробництва.

Розробка математичної моделі процесу різання є найважливішим етапом

створення алгоритму оптимізації. При традиційному, класичному, підході математична модель будується у вигляді системи рівнянь і нерівностей, що виражають зв'язки між керуючими впливами, обмеженнями і прийнятим критерієм оптимальності на основі класичних залежностей теорії різання. Таким чином, для випадку фрезерування торцевою фрезею оптимізаційна математична модель може бути представлена наступною системою рівнянь і нерівностей.

Зв'язок між управліннями  $s$  (хвилинна подача) і  $n$  (частота обертання шпинделя) та періодом  $T$  стійкості інструменту, що визначає його різальну спроможність, одержують за відомою з теорії різання залежністю:

$$V = \frac{\pi D_{\phi} n}{1000} = \frac{C_v D_{\phi}^{q_v} k_v}{T^m H^{x_v} s_z^{y_v} B^{u_v} z^{p_v}},$$

звідки обмеження за стійкістю інструменту має вигляд:

$$ns_z^{y_v} \leq \frac{1000 C_v D_{\phi}^{q_v} k_v}{\pi D_{\phi} T^m H^{x_v} B^{u_v} z^{p_v}} = \frac{318 C_v D_{\phi}^{q_v-1} k_v}{T^m H^{x_v} B^{u_v} z^{p_v}}, \quad (1)$$

де  $D_{\phi}$ ,  $z$  – діаметр (мм) і кількість зубців фрези;  $H$ ,  $B$  – глибина (мм) і ширина (мм) фрезерування;  $T$  – стійкість (хв.);  $C_v$ ,  $k_v$ ,  $q_v$ ,  $m$ ,  $u_v$ ,  $x_v$ ,  $p_v$  – коефіцієнти і показники ступеня емпіричної залежності [1].

Потужність різання  $N_p$  (кВт) залежить від складової  $P_z$  сили різання, яка у теорії різання вимірюється у  $H$  і швидкості  $V$  різання, яка вимірюється у м/хв. Враховуючи емпіричну залежність складової  $P_z$  сили різання від глибини  $H$ , подачі  $s_z$  та ширини  $B$  фрезерування, можна отримати нерівність, що зв'язує режим різання з потужністю  $N_{верст}$  двигуна головного руху верстата:

$$N_p = \frac{P_z V}{6 \cdot 10^4} = \frac{P_z \pi D_{\phi} n}{1000 \cdot 6 \cdot 10^4} = \frac{C_{Pz} H^{x_{Pz}} s_z^{y_{Pz}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz} \pi D_{\phi} n}{1000 \cdot 6 \cdot 10^4 \cdot D_{\phi}^{q_{Pz}} \cdot n^{w_{Pz}}} \leq N_{верст} \eta,$$

звідки обмеження за потужністю приводу головного руху:

$$n^{1-w_{Pz}} \cdot s_z^{y_{Pz}} \leq \frac{6 \cdot 10^7 N_{верст} \eta}{C_{Pz} H^{x_{Pz}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz} D_{\phi}^{1-q_{Pz}} \pi} = \frac{1.91 \cdot 10^7 N_{верст} \eta}{C_{Pz} H^{x_{Pz}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz} D_{\phi}^{1-q_{Pz}}}, \quad (2)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії приводу головного руху,  $C_{Pz}$ ,  $k_{Pz}$ ,  $x_{Pz}$ ,  $y_{Pz}$ ,  $u_{Pz}$ ,  $q_{Pz}$ ,  $w_{Pz}$  – коефіцієнти і показники емпіричної залежності сили різання від режиму фрезерування [1].

Таким чином, обмеження за стійкістю інструменту і потужністю різання визначаються аналітичними залежностями із застосуванням класичної теорії різання. Проте для визначення обмежень за шорсткістю поверхні достовірних залежностей або рекомендацій немає. Для визначення такого обмеження, яке може бути одним із утворюючих області можливих значень керуючих параметрів у задачі нелінійного програмування, доцільно розглянути схему формування шорсткості плоскої поверхні при торцевому фрезеруванні (рис. 1).

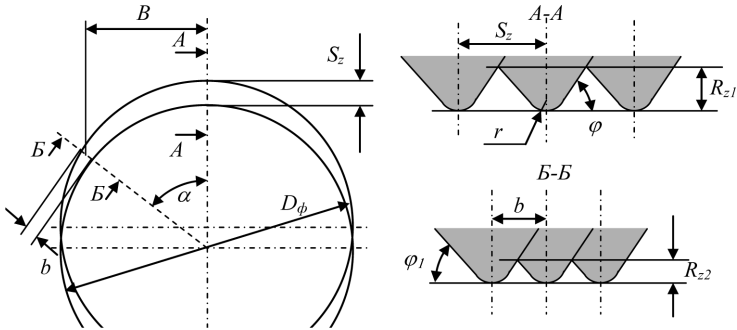


Рис. 1. Формування шорсткості поверхні

Аналіз геометричних побудов рис. 1 показує, що шорсткість поверхні формується аналогічно формуванню шорсткості поверхні при токарній обробці, тобто зуб фрези зрізає шар матеріалу подібно токарному різцю, але висота мікронерівностей залежить не тільки від геометричних параметрів зуба фрези і режиму різання, а й відстані  $B$  від центру фрези до траєкторії вимірювання.

З геометричних співвідношень рис. 1 можна довести, що:

$$b = S_z \cos \alpha = \frac{S_z}{D_\phi} \sqrt{D_\phi^2 - 4B^2}.$$

Таким чином, відома [1] залежність розрахунку висоти мікронерівностей при токарній обробці перетворюється на наступну:

$$R_z = \left[ \frac{S_z}{D_\phi} \sqrt{D_\phi^2 - 4B^2} - r \left( \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} + \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) \right] \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi},$$

звідки отримується обмеження, що накладається допустимою шорсткістю поверхні на подачу на зуб фрези:

$$S_z \leq \left[ R_z \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi} + r \left( \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} + \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) \right] \frac{D_\phi}{\sqrt{D_\phi^2 - 4B^2}}, \quad (3)$$

де  $r$  – радіус закруглення вершини зубця фрези,  $\varphi$ ,  $\varphi_1$  – головний та допоміжний кути у плані зубця фрези,

$R_z$  – параметр шорсткості поверхні.

Слід зауважити, що користування залежністю (3) можливо тільки при  $B < D_\phi$ . Отримана модель утворення шорсткості поверхні при торцевому фрезеруванні підтверджується 3-D моделюванням обробленої поверхні (рис. 2). Легко побачити, що висота мікронерівностей зменшується при пересуванні від осі фрези при однакових інших параметрах процесу фрезерування. При несиметричному фрезеруванні, коли ширина фрезерування менша за радіус фрези, до розрахунку слід приймати мінімальну відстань до осі фрези.

Наступне обмеження обирається з умови міцності та жорсткості ТОС. Наприклад подача за максимальною силою  $P_m$ , що забезпечує привід подачі верстату, може бути розрахована, з урахуванням співвідношення  $0,4 \times P_z = P_m$ , за наступною залежністю [1]:

$$\frac{0.4 \cdot C_{Pz} H^{x_{Pz}} s_z^{y_{Pz}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz}}{D_{\phi}^{q_{Pz}} n^{w_{Pz}}} = P_n,$$

звідки обмеження за допустимою силою подачі:

$$\frac{s_z^{y_{Pz}}}{n^{w_{Pz}}} \leq \frac{P_n \cdot D_{\phi}^{q_{Pz}}}{0.4 \cdot C_{Pz} H^{x_{Pz}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz}}$$

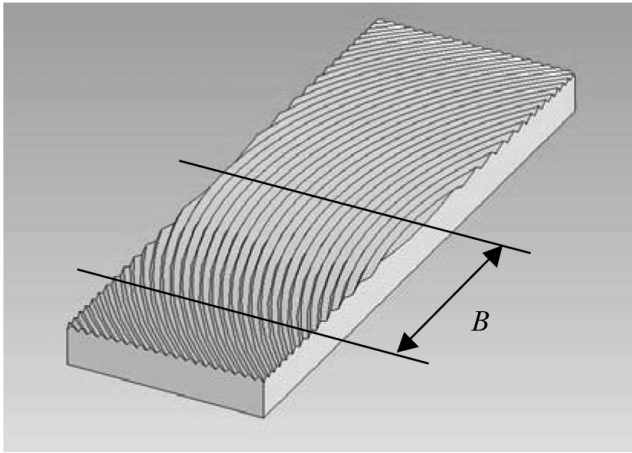


Рис. 2. 3-D модель поверхні після торцевого фрезерування

Конструктивні обмеження, що визначаються за можливостями металорізального верстата:

діапазон повздовжніх подач (мм/хв.):

$$s_{min} \leq s \leq s_{max}; \tag{5}$$

діапазон частот обертання шпинделя (об./хв.):

$$n_{min} \leq n \leq n_{max}. \tag{6}$$

Як оцінку функцію за критерієм максимальної продуктивності приймають:

$$f = n \cdot s_z \rightarrow \max, \tag{7}$$

оскільки при цьому основний час обробки  $t_o = L/n \cdot s_z \rightarrow \min$  ( $L$  – довжина обробки).

Одержана математична модель (1–7) складає ядро створеної прикладної програми автоматизованого вибору оптимального режиму різання при торцевому фрезеруванні, інтерфейс якої представлений на рис. 3.

При функціонуванні програми після завдання вихідних даних і натискання кнопки «Застосувати дані» у графічному вікні інтерфейсу, на фазовій площині (частота обертання шпинделя – подача на зуб фрези) з'являються графіки обмежень. Лінії 1 і 2 – максимальна і мінімальна частота обертання шпинделя, лінії 3 і 4 – обмеження за максимальною і мінімальною подачею верстата, лінія

5 – обмеження за допустимою шорсткістю поверхні, лінія 6 – обмеження за стійкістю інструменту, лінія 7 – обмеження за потужністю верстата, лінія 8 – обмеження за максимально допустимою силою подачі. Слід зауважити, що обмеження за максимальною і мінімальною подачею, що вимірюються і встановлюються на верстаті у мм/хв. на фазовій площині  $S_z - n$  перетворилися у гіперболи згідно залежності, що зв'язує «хвилинну» подачу і подачу на зуб:  $S_z = S/zn$ .

Область  $D$  допустимих значень частоти обертання шпинделя і подачі на зуб, що відповідає представленим на інтерфейсі вихідним даним процесу різання, утворена перетином наступних обмежень: за максимальною частотою обертання (лінія 1); за мінімальною подачею (лінія 4); за допустимою потужністю різання (лінія 7); за максимально допустимою силою подачі (лінія 8) і за допустимою шорсткістю (лінія 5). Проте зі зміною вихідних даних процесу, і зокрема глибини різання, область допустимих значень може утворюватись іншими обмеженнями.

Лінія 9 відображає оцінку функцію оптимізації за максимальною продуктивністю, задовольняє залежності (7) і з'являється на фазовій площині при переміщенні курсору мишки. У відповідності до вирішення задачі оптимізації, максимальній продуктивності фрезерування при задоволенні всім обмеженням буде відповідати вершина області  $D$  допустимих значень, найбільш віддалена від початку координат. Таким чином, оптимальні величини режиму різання відповідають координатам вершини  $A$  області можливих значень і з'являються на інтерфейсі при натисканні лівої клавіші мишки.

Розроблений програмний продукт може складати основу модулю "оптимізаційна модель" САПР ТП при визначенні режиму різання, а також використовуватися для дослідження впливу різних параметрів процесу обробки на його оптимальний режим. Причому використання програмного продукту в САП для верстатів з ЧПУ не вимагає будь-якої модернізації верстата, і не ускладнює процес управління. За попередніми оцінками виграш у продуктивності може складати від 20% до 80% залежно від процесу оброблення, що застосовується.

Окремою, але дуже важливою областю застосування розробленої програми, є застосування у навчальному процесі підготовки фахівців з технології машинобудування. Тому вона увійшла у навально-методичний пакет "Комп'ютерний практикум з теорії різання", розроблений Галузевою лабораторією віртуальних засобів навчання при механіко-машинобудівному інституті НТУУ "КПІ".

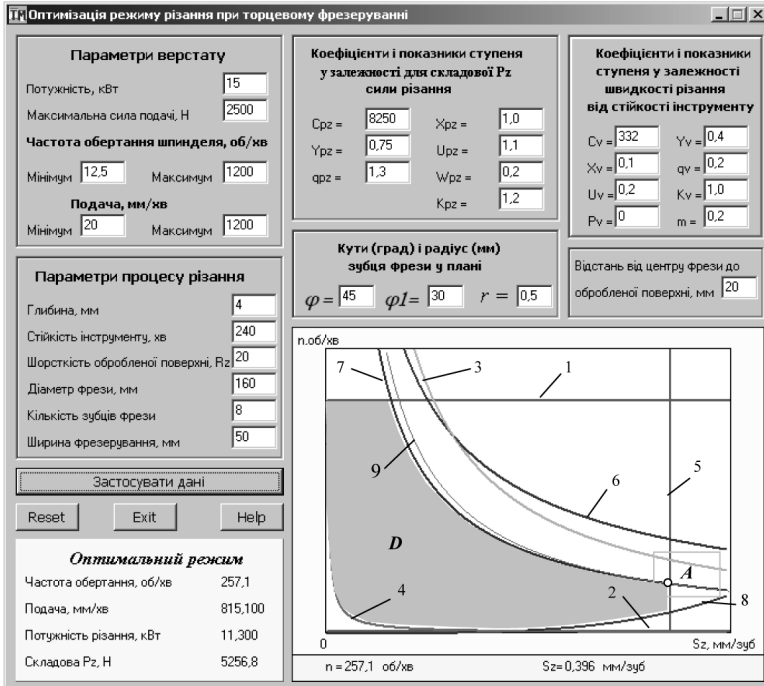


Рис. 3. Інтерфейс прикладної програми оптимізації процесу фрезерування (торцевою фрезою)

Залежно від зміни глибини різання вершина А області допустимих значень, що відповідають оптимальному (за продуктивністю) режиму різання утворюється перетином різних обмежень. Отримані експериментальні дані, що відповідають оптимальному режиму різання у функції глибини різання представленні на рис. 4.

Розроблена програма дає можливість експериментального дослідження залежностей оптимального режиму різання від параметрів процесу торцевого фрезерування. На етапі технологічної підготовки виробництва такі дослідження дають можливість оцінити доцільність використання того чи іншого верстата, визначити обмеження, що впливають на загальний оптимум і запропонувати зміни до технологічного процесу, що підвищать продуктивність оброблення.

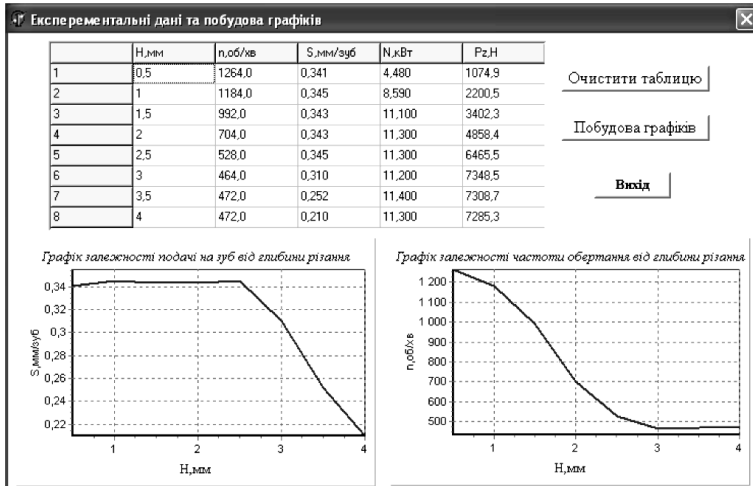


Рис. 4. Інтерфейс занесення у таблицю отриманих експериментальних даних та побудова графіків

Особливо корисним такі дослідження виявляються при визначенні перерозподілу глибини різання при обробленні у декілька робочих ходів, наприклад чорновий і чистовий хід тощо.

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. Обработка металлов резанием : Справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм й др.; Под общ. ред. А.А. Панова. – М.: Машиностроение. 1988. – 736 с.

ПЕТРАКОВ Юрій Володимирович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування Національного технічного університету України "КПІ".

Наукові інтереси:

– управління процесами оброблення різанням.

ГУРІНА Наталія Володимирівна – магістр Національного технічного університету України "КПІ".

Наукові інтереси:

– оптимізація процесів різання.

Подано 17.09.2005