

УДК 621.923

Петраков Ю.В. д.т.н., проф.; Мацківський О.С. асп.  
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРИФЕРІЙНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ КІНЦЕВИМИ ФРЕЗАМИ

Petrakov Y., Matskovsky A.  
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine ([yp-86@yandex.ru](mailto:yp-86@yandex.ru))

### OPTIMIZATION OF END MILLS PERIPHERY MILLING

*Розроблена математична модель для оптимізації процесу периферійного фрезерування, яка містить чисельний метод визначення сили різання, а також рівняння, що зв'язують обмеження з керованими параметрами режиму різання: частотою обертання шпинделя і подачею. Доведено, що шорсткість поверхні не залежить від геометричної складової профілю, що утворюється при переміщенні зубів фрези за траєкторією квазітрохоїди, а визначається максимальною амплітудою і частотою спектру сили різання, а також частотними характеристиками технологічної оброблювальної системи. Оптимальний режим різання формується в області допустимих значень фазового простору «частота обертання – подача» в основному двома обмеженнями: за стійкістю інструменту і за шорсткістю. Створена прикладна програма для автоматизованого визначення оптимального режиму різання при периферійному фрезеруванні сталей, чавунів та легких сплавів на основі алюмінію.*

*Ключові слова:* оптимізація периферійного фрезерування, математична модель, шорсткість, сила різання.

#### Вступ

Периферійне фрезерування кінцевими фрезами є одною з найбільш розповсюджених операцій оброблення різних поверхонь деталей машин. У сучасному виробництві такі операції виконуються на верстатах з ЧПУ при автоматизації підготовки управляючих програм з застосуванням САМ-систем. Оскільки такі операції супроводжуються зміною умов різання (навіть при еквідистантному припуску) в широкому діапазоні, єдиною альтернативою є перманентне управління процесом різання з використанням одного з відомих методів [1]. Наразі деякі САМ-системи, наприклад, Siemens NX, пропонують проектування управляючих програм з використанням спеціальної опції «оптимізація». Проте програмування обробки відбувається без урахування цілої низки вихідних даних, необхідних для розв'язання задачі оптимізації в класичному вигляді, оскільки в її функціонал закладено тільки інформацію про інструмент і матеріал оброблення, тоді як потрібно враховувати ще й такі параметри як потужність верстата, параметри точності деталі, обмеження за швидкістю подачі і таке інше. А тому вибраний у більшості випадків режим оброблення не є оптимальним в класичному розумінні, оскільки він просто приведений до стандартного ряду, а це в свою чергу знижує теоретично можливу продуктивність верстатного обладнання з ЧПК.

В роботі [2] запропоновано управляти процесом периферійного фрезерування через систему адаптивного управління, яка здатна підтримувати потужність різання на заданому постійному рівні, тобто стабілізувати процес. Тут залишається актуальною задача призначення такої величини потужності різання, яка забезпечить оптимізацію, а з урахуванням стабілізації, підтримку оптимального режиму на всіх ділянках оброблюваної поверхні. Задача оптимізації периферійного фрезерування може бути сформульована наступним чином: визначити такі невід'ємні значення параметрів режиму різання – повздовжньої подачі та частоти обертання шпинделя – які забезпечать виконання всіх обмежень за якістю і обумовлять мінімум часу оброблення. Таким чином, задача оптимізації процесу у такій постановці відноситься до класичних однокритеріальних задач нелінійного програмування, що не мають принципових 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.

#### Мета роботи

Розробити математичну модель процесу периферійного фрезерування, що зв'яже управління (подачу і частоту обертання шпинделя фрези) з обмеженнями, які накладаються на процес технологічними та конструкторськими вимогами. Створити програмне забезпечення автоматизації вирішення задачі оптимізації для використання в системі адаптивного управління (САУ) у якості інструменту визначення необхідної потужності різання.

#### Викладення основного матеріалу

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 управляючими впливами, обмеженнями і прийнятим критерієм оптимальності на основі класичних залежностей теорії різання. Таким чином, для випадку периферійного фрезерування кінцевими фрезами оптимізаційна математична модель може бути представлена наступною системою рівнянь і нерівностей, що виражають основні обмеження через складові режиму різання, якими управляють.

1. *Обмеження за стійкістю інструменту.* Зв'язок між управліннями  $S_z$  (подача на зуб) і  $n$  (частота обертання шпинделя) та періодом  $T$  стійкості інструменту, що визначає його різальну спроможність, одержують за відомою з теорії різання залежністю [3,4]:

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

звідки обмеження за стійкістю інструменту має вигляд:

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

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

Для застосування у прикладній програмі були використані дані [3,4], що представлені у табл.1.

Таблиця 1

Експериментальні дані для визначення стійкості фрези

Матеріал заготовки	Матеріал інструменту	$C_v$	$q_v$	$x_v$	$y_v$	$u_v$	$p_v$	$m_v$
Сталь $\sigma_B=750$ МПа	T15K6	230	0,44	0,21	0,26	0,1	0,1	0,37
Сталь $\sigma_B=750$ МПа	P6M6	50	0,45	0,5	0,5	0,1	0,1	0,33
Чавун HB 190	BK6	800	0,37	0,13	0,19	0,23	0,1	0,42
Чавун HB 190	P6M5	60	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3	0,25
Алюміній $\sigma_B=200$ МПа	P6M5	200	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,33

2. *Обмеження за потужністю різання.* Для визначення обмеження за потужністю різання необхідно перш за все знайти залежність окружної  $P_o$  складової сили різання від режиму та умов різання. Доцільно скористатися методикою, що була розроблена в [5,6] і ґрунтується на схемі зрізування припуску (рис.1).

Зуб фрези рухається за поверхнею різання, яка у перетині, перпендикулярному вісі фрези, приблизно представляється дугою  $\cup DE'$ . Для визначення центрального кута  $\theta_{max}$  різання (за дугою  $\cup DE$ ) можна скористатися залежністю:

$$\theta_{max} = \arccos \left( 1 - \frac{H}{R_\phi} \right) \quad (2)$$

де  $H$  – глибина різання,  $R_\phi$  – радіус фрези.

Поточна товщина шару, що зрізується, може бути знайдена з геометричних співвідношень трикутника  $ACB$ . Якщо, з деяким наближенням, вважати  $\Delta ACB$  прямокутним, а  $\angle BAC \approx \theta$ , то товщина  $a$  шару, що зрізується зубом фрези, дорівнює:

$$a = S_z \sin \theta, \quad (3)$$

де  $S_z$  – подача на зуб фрези.

Спираючись на математичну модель процесу фрезерування кінцевими фрезами, розроблену в роботі [6], можна визначити окружну складову сили різання за наступною залежністю:

$$P_o = \int_0^B \int_0^{\theta_{max}} C_p (S_z \sin \theta)^{1-k} dB d\theta, \quad (4)$$

де  $B$  – ширина різання,  $C_p, k$  – емпіричні коефіцієнт і показник ступеня, величини яких визначаються за таблицею 2 [4,7].

Таблиця 2

Експериментальні дані для визначення окружної складової сили різання

№	Матеріал заготовки	$C_p$	$k$
1	Сталь $\sigma_B=750$ МПа	1350	0,29
2	Чавун HB190	770	0,33
3	Алюміній $\sigma_B=200$ МПа	220	0,52

Доведено [6], що процес фрезерування характеризується зміною сили різання за часом, а запропонована чисельна процедура дозволяє визначити як максимальну, так і середню величину. Тому за максимальною величиною окружної складової сили різання визначатиметься обмеження за необхідною силою повздовжньої подачі, а середня величина окружної складової сили різання визначатиме потужність, що витрачається на різання і формує обмеження за потужністю головного приводу верстата:

$$N_p = \frac{P_{cp} V}{6 \cdot 10^4} = \frac{P_{cp} \pi D_f n}{1000 \cdot 6 \cdot 10^4} \leq N_{верст} \eta, \quad (5)$$

де  $N_p$  – потужність різання у кВт,  $N_{верст}$ ,  $\eta$  – потужність і коефіцієнт корисної дії приводу головного руху.

**3. Обмеження за шорсткістю поверхні деталі.** Як показує аналіз [3,4,7,8,9], для визначення обмежень за шорсткістю поверхні при периферійному фрезеруванні достовірних залежностей або недостатньо, або просто немає. Для визначення такого обмеження, яке може бути одним із утворюючих область можливих значень параметрів, що управляють, в задачі нелінійного програмування, доцільно користуватися загальним підходом, який представляє шорсткість поверхні у вигляді композиційної моделі, яка складається з детермінованої і випадкової складових [10]. Детермінована складова визначається з геометричних співвідношень утворення гребінця на поверхні деталі між траєкторіями руху двох сусідніх зубів фрези. Ураховуючи, що кожний зуб виконує складний рух при обертанні фрези і одночасному переміщенні за напрямком подачі, то траєкторію, яка утворюється, можна віднести до квазітроход. При фрезеруванні плоскої поверхні траєкторія вершини зуба описуються наступними рівняннями в параметричній формі:

$$\begin{cases} x = R_f \sin(nt\pi/30) \pm S_{xв} t / 60 \\ y = R_f [1 - \cos(nt\pi/30)] \end{cases}, \quad (6)$$

де  $R_f$  – радіус фрези (мм),  $n$  – частота обертання фрези (мм/об),  $S_{xв}$  – хвилинна подача (мм/хв),  $t$  – час (с). Знак «+» при попутному, знак «-» при зустрічному фрезеруванні.

При фрезеруванні циліндричної поверхні така траєкторія визначається аналогічно за залежностями:

$$\begin{cases} x = (R_f + R_k) \sin(S_{xв} (R_f + R_k) t / 60) + R_f \sin\left(\left(n\pi/30 + S_{xв} (R_f + R_k) / 60\right) t\right) \\ y = (R_f + R_k) \cos(S_{xв} (R_f + R_k) t / 60) - R_f \cos\left(\left(n\pi/30 + S_{xв} (R_f + R_k) / 60\right) t\right) \end{cases}, \quad (7)$$

де  $R_k$  – радіус кривизни циліндричної поверхні (мм).

Для розрахунку висоти такого гребінця була створена прикладна програма моделювання траєкторій при периферійному фрезеруванні як плоских, так і циліндричних поверхонь (рис.2), що базується на встановлених вище залежностях. За допомогою створеної програми, використовуючи функцію збільшення зображення траєкторій першого і другого зубців фрези, як показано на рис.2, можна визначити висоту  $R_{cp}$  гребінця, що утворюється. Причому для моделювання траєкторій зубців одразу можна визначити траєкторії як для зустрічного (зона А на рис.2), так і для попутного (зона В на рис.2) фрезерування. Проведені дослідження показали, що висота гребінця при інших однакових умовах залежить від напрямку фрезерування: для зустрічного фрезерування вона завжди менша ніж для попутного, а також від кривизни обробленої поверхні: при збільшенні кривизни висота гребінця зменшується.

В цілому, встановлено, що висота детермінованої складової шорсткості (висота  $R_{cp}$  гребінця), яка

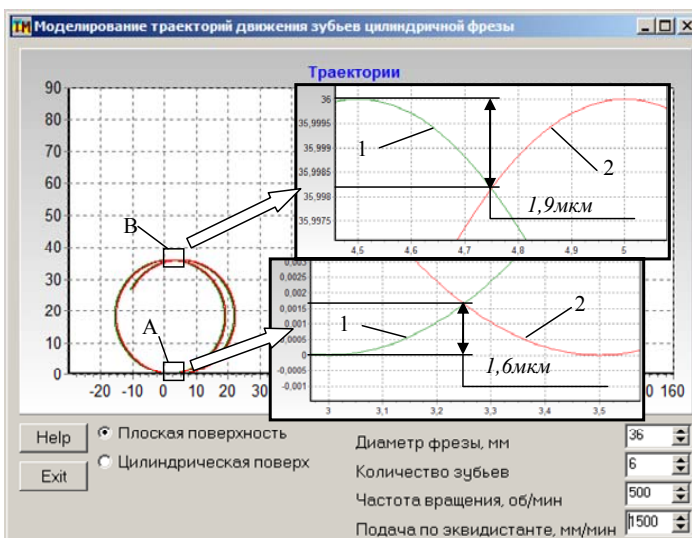


Рис. 2. Інтерфейси прикладної програми для визначення детермінованої складової шорсткості

виникає в наслідок геометричної взаємодії фрези з поверхнею заготовки для переважної більшості режимів різання складає мізерну частку висоти реального профілю шорсткості. Тому для визначення загальної картини утворення шорсткості при периферійному фрезеруванні були проведені експерименти з фрезерування циліндричної поверхні з зазначеними у віконцях інтерфейсу за рис.2 прикладної програми параметрами фрези (рис.3,а). Управляюча програма спроектована для фрезерування периферії циліндричної поверхні з радіусом  $R=100$ мм за шістьма секторами ( $60^\circ$  кожний) з глибиною різання 0,5мм, шириною 10мм та подачами 300мм/хв, 200мм/хв і 100мм/хв в зустрічному і попутному напрямках на різних секторах циліндра.

Вимірювання шорсткості виконувалось на цифровому кругломірі (рис.3,б). Для

оброблення результатів вимірювань була створена прикладна програма, яка дозволяє не тільки визначити стандартні параметри шорсткості поверхні з урахуванням кривизни обробленої поверхні, а й виконувати частотний аналіз профілограми. На рис.3, в показаний стан інтерфейсу при дослідженні профілографи поверхні, що була оброблена при зустрічному фрезеруванні з подачею 300мм/хв. Отриманий спектр шорсткості (рис.3, г) показує, що він містить декілька гармонік з максимальною амплітудою.

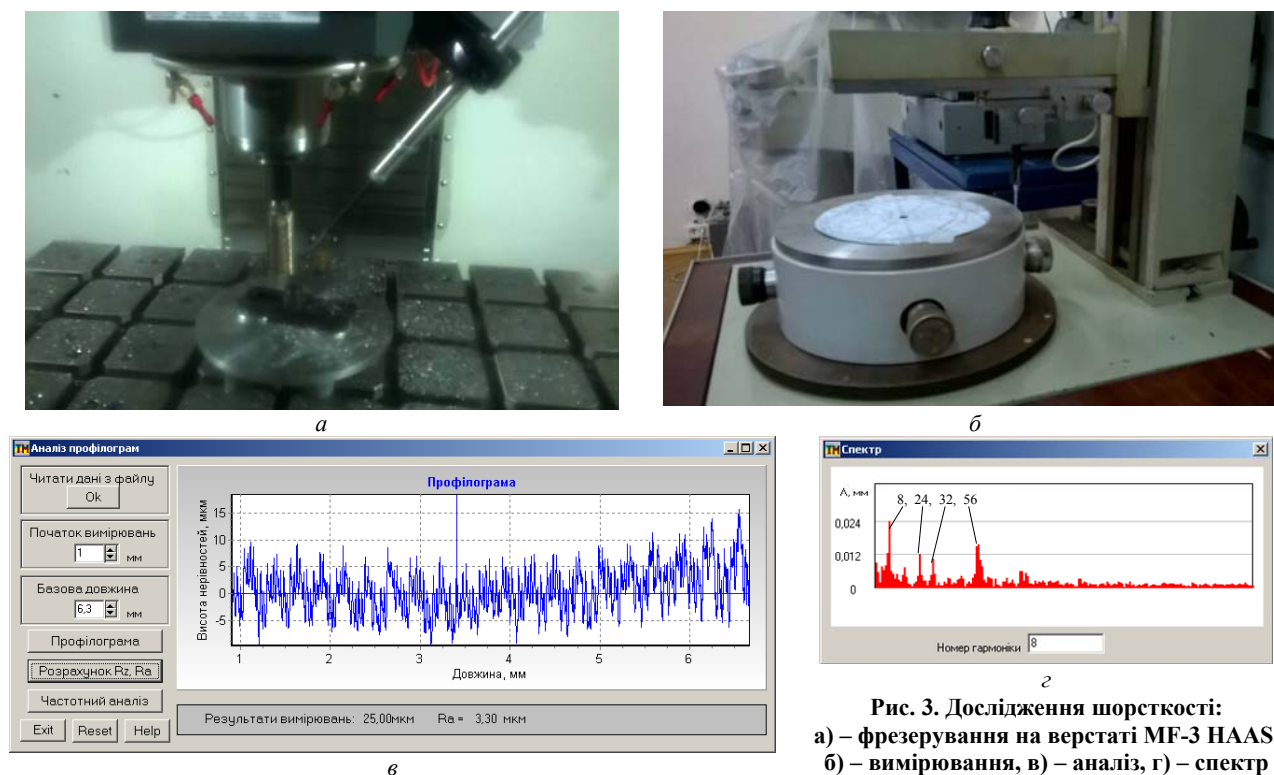


Рис. 3. Дослідження шорсткості: а) – фрезерування на верстаті MF-3 HAAS, б) – вимірювання, в) – аналіз, г) – спектр

Для визначення частот цих гармонік зручно скористатися передбаченою в програмі опцією виключення всіх вибраних гармонік, окрім бажаної, зі спектру і представлення результатів на вихідній профілограмі – на рис.4 лінією 1 позначена вихідна профілограма, а лінією 2 – гармоніка спектру. При запрограмованій подачі за еквідистантою  $S_{xв} = 300 \text{ мм/хв}$  швидкість  $V_{\phi}$  формування визначається за пропорційною залежністю  $V_{\phi} = S_{xв} R / (R + R_{\phi}) = 300 \cdot 100 / (100 + 18) = 254,24 \text{ мм/хв}$ . Таким чином, відстань 2мм (дивись рис.4) буде пройдена за 0,472с і за цей час відбулося 8 коливань, а, отже, частота 8-мої гармоніки (рис.4,а) дорівнює 16,9Гц, відповідно, частота 24-ої гармоніки (рис.4,б) дорівнює 50,7Гц.

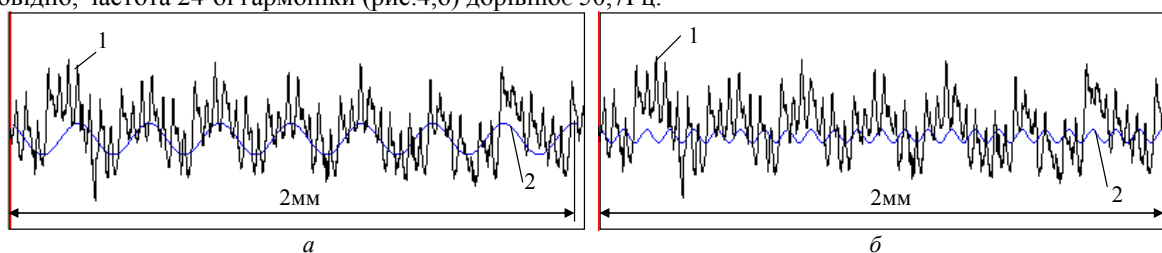


Рис. 4. Гармоніки спектру на вихідній профілограмі поверхні: а) – 8-ма гармоніка, б) – 24-та гармоніка

Аналіз виконаних досліджень дозволяє стверджувати, що, як для умов експерименту, так і для більшості режимів фрезерування, детермінована складова композиційної моделі шорсткості поверхні (висота  $R_{sp}$  гребінця) складає зовсім незначну частку висоти реального профілю шорсткості, а випадкова складова превалує. Так, для умов експерименту ( $S_z = 0,1 \text{ мм/зуб}$ ,  $D_{\phi} = 36 \text{ мм}$ ) за формулою визначення теоретичної висоти гребінця при фрезеруванні циліндричними фрезами [8, 9] маємо  $R_{sp} = S_z^2 / (4D_{\phi}) = 0,1^2 / (4 \cdot 36) = 0,07 \text{ мкм}$ . Приблизно такі ж результати дає і моделювання в прикладній програмі, інтерфейс якої показаний на рис. 2.

Отже, спектр профілограми шорсткості поверхні цілком залежить від частотних характеристик ТОС, яка знаходиться під дією збуджуючої сили різання, головна гармоніка спектру якої може бути визначена за

частотою обертання фрези  $n_z / 60 = 500 \cdot 6 / 60 = 50 \text{ Гц}$ . Така частота співпадає з частотою 24-ої гармоніки спектру профілограми шорсткості, до того ж всі основні гармоніки спектру (дивись рис.3, г) є кратними.

Для визначення характеру зміни збуджуючої сили доцільно скористатися розробленою моделлю (2-4), яка втілена в прикладній програмі (рис.5) з автоматичним визначенням меж інтегрування. У віконцях зліва введені вихідні дані, з меню, що випадає, обраний матеріал заготовки у відповідності до умов експерименту. Результати моделювання виводяться в графічному вигляді у вікні «Осцилограф» за кут обертання фрези, що дорівнює куту між зубцями ( $60^\circ$ ). Процес фрезерування є переривчастим, окружна складова сили різання (лінія 1) досягає  $406,3 \text{ Н}$ , а її середня  $P_{cp}$  величина (лінія 2) складає  $127,2 \text{ Н}$  (точне визначення величин можливе завдяки опції збільшення зображення в графічному полі віртуального осцилографа).

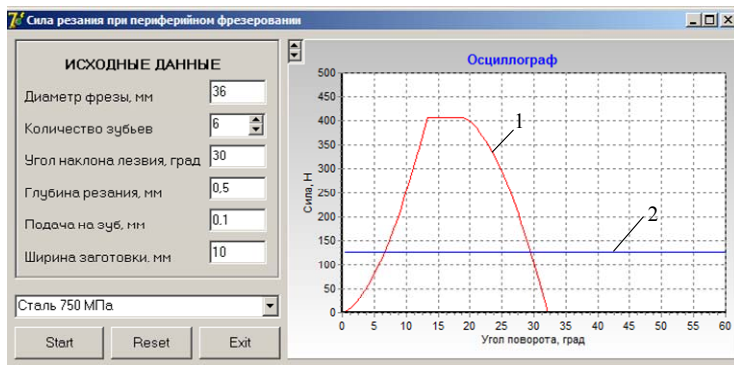


Рис. 5. Інтерфейс програми моделювання сили різання

при периферійному фрезеруванні сприймається безпосередньо приводом повздовжньої подачі, то обмеження за подачею на зуб визначається за процедурою чисельного моделювання визначення окружної складової сили різання, яка здійснюється за залежностями (2-4).

**5. Обмеження за міцністю та жорсткістю ТОС.** Таке обмеження визначається за найбільш слабкою ланкою ТОС, якою, як правило, є інструмент. Оскільки модель дає можливість визначити окружну силу різання, можлива перевірка інструменту на міцність. Розрахунок допустимої подачі за міцністю доцільно виконувати за емпіричною залежністю [1], яку можна представити у дещо змінному для зручності обчислень вигляді:

$$[S_z]_{дон} = C_3 \frac{D_\phi^{5,21}}{\left( Bz \sqrt{k_e l^2 + D_\phi^2} \right)^{1,35} H^{1,16}}, \quad (8)$$

де  $D_\phi$ ,  $z$ ,  $l$  - діаметр, кількість зубців і довжина консолі фрези. Коефіцієнт  $C_3$  визначається у залежності від меж міцності для матеріалу фрези та матеріалу, що обробляється. Наприклад, при  $[\sigma] = 800 \text{ МПа}$  маємо:

- ✓ для обробки сталей  $C_3 = 0.056$ ,  $k_e = 2.56$ ;
- ✓ для обробки легких сплавів  $C_3 = 0.36$ ,  $k_e = 1.44$ .

**6. Конструктивні обмеження, що визначаються за можливостями металорізального верстату.** Ураховуючи вирішення задачі оптимізації у фазовій площині «частота обертання шпинделя – подача на зуб», обмеження за швидкостями подач має бути представлене у відповідній розмірності:

$$\frac{(S_{xв})_{\min}}{zn_{\max}} \leq [S_z]_{дон} \leq \frac{(S_{xв})_{\max}}{zn_{\min}}, \quad (9)$$

де  $S_{xв}$  - хвилинна подача (мм/хв).

Діапазон частот обертання шпинделя (об/хв.) також є обмеженням:

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}, \quad (10)$$

В якості оцінної функції за критерієм максимальної продуктивності приймають:

$$f = nS_z \rightarrow \max, \quad (11)$$

оскільки при цьому основний час обробки  $t_o = L / nS_z \rightarrow \min$  (де  $L$  – довжина обробки).

Одержана математична модель (1–11), разом з ітеративним алгоритмом, чисельним методом визначення сили різання і обмеження за шорсткістю, складає ядро створеної прикладної програми автоматизованого вибору оптимального режиму різання при периферійному фрезеруванні, інтерфейс якої показаний на рис.6.

Тоді радіальна складова сили різання  $P_r = 0,4P_o = 162,5 \text{ Н}$ , а при жорсткості ТОС  $C = 20000 \text{ Н/мм}$  і коефіцієнті динамічності  $k = 2,5$  очікувана шорсткість за параметром  $Rz$  може бути розрахована за простою залежністю:  $Rz = P_r k / C = 162,5 \cdot 2,5 / 20000 = 0,020 \text{ мм}$ , що в цілому відповідає результатам вимірів (дивись рис.3,в).

**4. Обмеження за силою подачі верстату.** Наступне обмеження обирається з умови, що накладається максимально допустимою силою  $P_n$ , яку забезпечує привод подачі верстату. Оскільки окружна складова сили різання

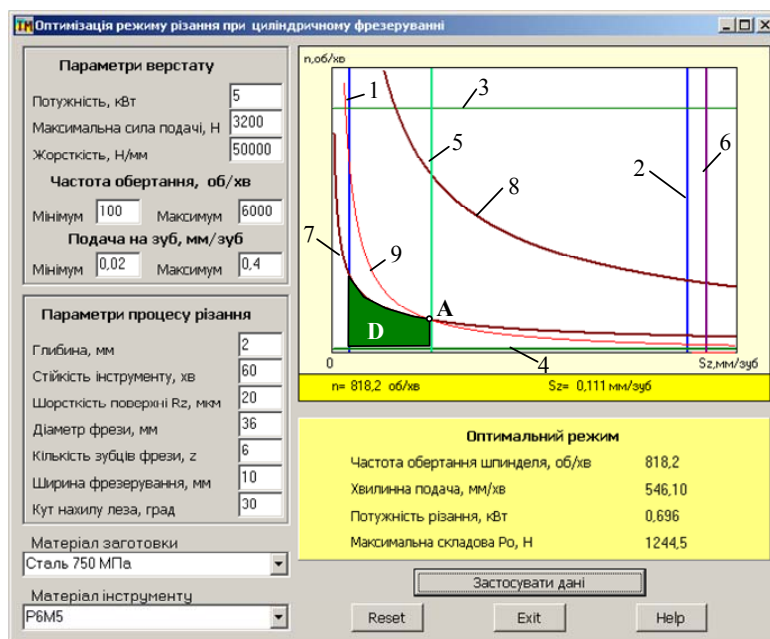


Рис. 6. Інтерфейс прикладної програми оптимізації

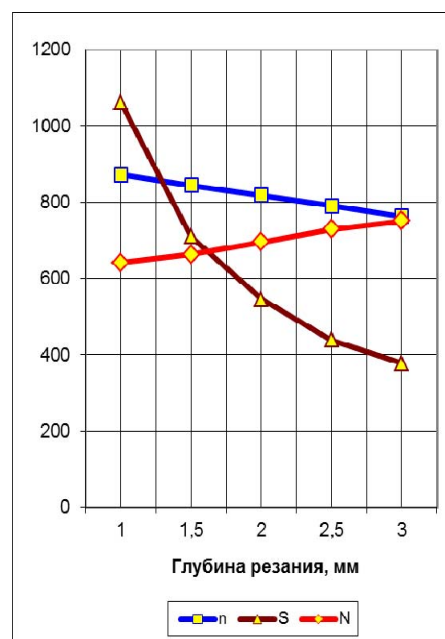


Рис. 7. Оптиміальні режими

У відповідності до вихідних даних, в графічному полі, що визначає фазовий простір  $n - Sz$ , при натисканні кнопки «Застосувати дані» з'являються лінії обмежень: лінія 1 і 2 – обмеження, що визначають можливий діапазон подач, лінії 3 і 4 – обмеження, що визначають можливий діапазон частот обертання шпинделя, лінія 5 – обмеження за шорсткістю, лінія 6 – обмеження за максимальною силою подачі верстату, лінія 7 – обмеження за стійкістю фрези, лінія 8 – обмеження за потужністю. Область **D** допустимих значень частоти обертання шпинделя і подачі на зуб, що відповідає представленим на інтерфейсі вихідним даним процесу різання утворена перетином обмежень за стійкістю і шорсткістю, а оптимальний режим визначається за лінією 9, яка відповідає залежності (11) при торканні максимально віддаленої від початку координат точки **A** області допустимих значень.

Як зазначалося раніше, периферійне фрезерування, особливо контурне, характеризується зміною глибини різання. На рис.7 представлені результати визначення оптимального режиму різання за допомогою створеної програми для різних глибин різання в діапазоні від 1мм до 3 мм (за вертикальною віссю: частота  $n$  обертання шпинделя (об/хв), подача  $S$  (мм/хв), потужність  $N$  різання (Вт)). Видно, що для забезпечення оптимального режиму різання необхідно змінювати подачу, при цьому частота обертання шпинделя і потужність різання змінюються в незначному діапазоні. Отже, підтримка стабільної потужності різання в САУ за рахунок управління подачею при постійній частоті обертання шпинделя може забезпечити квазіоптимальний режим різання. При цьому для уникнення можливих порушень обмежень при зміні умов фрезерування бажано на вході САУ призначати мінімальну величину потужності при відповідній частоті обертання шпинделя фрези за очікуваним діапазоном зміни глибини різання.

Розроблений програмний продукт також 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.

## Висновки

1. Розроблений алгоритм і відповідна чисельна процедура моделювання окружної складової сили різання при периферійному фрезеруванні, забезпечує адекватність реальному процесу, який є суттєво нестационарним і дозволяє визначити плин процесу у часі за кут повороту фрези на кут між зубцями. Встановлено, що максимальна величина окружної складової сили різання впливає на визначення обмеження за силою подачі, а середнє значення визначає обмеження за потужністю різання.

2. Визначено, що шорсткість при периферійному фрезеруванні утворюється в основному внаслідок коливаний ТОС, причому висота мікронерівностей визначається амплітудою і частотою головної гармоніки сили різання, що збуджує і частотними характеристиками ТОС. Встановлено, що процес утворення шорсткості при периферійному фрезеруванні потребує більш детального вивчення саме в напрямку визначення взаємодії спектра збуджуючої сили зі спектром ТОС.

3. Створена прикладна програма визначення оптимального режиму різання при периферійному фрезеруванні. При використанні програми автоматично визначаються основні характеристики процесу різання і режим різання, що є оптимальним за критерієм максимуму продуктивності. Визначено, що при зміні глибини різання для забезпечення оптимального процесу змінюється подача, а частота обертання шпинделя і потужність

різання змінюються не суттєво, що дозволяє стверджувати, що при управлінні подачею при постійній частоті обертання шпинделя в адаптивній системі стабілізації потужності різання режим різання не суттєво відрізняється від оптимального.

**Анотація.** Разработана математическая модель для оптимизации процесса периферийного фрезерования, которая содержит численный метод определения силы резания, а также уравнения связывающие ограничения с управляемыми параметрами режима резания: частотой вращения шпинделя и подачей. Доказано, что шероховатость поверхности не зависит от геометрической составляющей профиля, образующейся при перемещении зубьев фрезы по квазитрохоиде, а определяется максимальной амплитудой и частотой спектра силы резания, а также частотными характеристиками технологической обрабатывающей системы. Оптимальный режим резания формируется в области допустимых значений фазового пространства «частота вращения – подача» в основном двумя ограничениями: по стойкости инструмента и по шероховатости. Создана прикладная программа для автоматизированного определения оптимального режима резания при периферийном фрезеровании сталей, чугунов и легких сплавов на основе алюминия.

**Ключевые слова:** оптимизация периферийного фрезерования, математическая модель, шероховатость, сила резания.

**Abstract.** A mathematical model is developed for optimization of process of the peripheral milling, which contains the digital method of determination of cutting force, and also equalizations relating limitations with the guided parameters of the cutting mode: by frequency of rotation of spindle and feed-rate. It is well-proven that the roughness of surface does not depend on the geometrical constituent of type, appearing at moving of points milling cutter on a cvasytrochoid, and determined maximal amplitude and frequency of spectrum of cutting force, and also by frequency descriptions of the technological processing system. The optimum mode of cutting is formed in area of legitimate values of phase space «frequency of rotation – feed-rate» mainly by two limitations: on firmness of instrument and on a roughness. The application program is created for the automated determination of the optimum mode of cutting at the peripheral milling of steels, cast-irons and easy alloys on the basis of aluminum.

**Keywords:** optimization of the peripheral milling, mathematical model, roughness, cutting force.

#### Бібліографічний список використаної літератури

1. Петраков Ю.В., Драчев О.И. Автоматическое управление процессами резания / ТНТ-Press, 2014, 408с.
2. Петраков Ю.В., Мацківський О.С. Моделювання системи адаптивного управління фрезеруванням на верстаті з ЧПК, Вісник НТУУ «КПІ», серія машинобудування №74, Київ, 2015, С.146-152.
3. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания: учеб. Минск: Новое знание, 2005.-512с.
4. Справочник технолога-машиностроителя. в 2-х т / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова - М.:Машиностроение-1, 2003, 944с.
5. Петраков Ю.В., Драчев О.И. Моделирование процессов резания / ТНТ-Press, 2013, 240с.
6. Петраков Ю.В., Мацківський О.С. Моделювання фрезерування кінцевими фрезами / Вісник НТУУ «КПІ», серія машинобудування, №73, Київ, 2015, С.78-83.
7. GARANT Справочник по обработке резанием [www.garant-tools.com](http://www.garant-tools.com) 857с.
8. Мазур М.П., Внуков Ю.М., Доброскок В.Л. та ін. Основи теорії різання матеріалів / Новий Світ, Львів, 2010.-412с.
9. Лукьяненко О.Л. Визуализация формирования шероховатости при концевом фрезеровании тонкостенных деталей / Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні №2, 2014. С. 52-60.
10. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход). - М.: Наука, 1975. - 344 с.

#### References

1. Petrakov, Y.V. and Drachev, O.I. (2014), *Avtomatichesroe upravlenie processami rezania*. THT-Press, Kiev, Ukraine.
2. Petrakov, Y.V., Mackivski, O.S. (2015), Modeluvannia systemi adaptivnogo upravlinnia frezeruvanniam na verstati z CHPK, *Visnyk NTUU "KPI", seria mashinobuduvania*. 74, pp.146-152.
3. Yaschericyn, P.I., Feldshteyn, E.E. and Kornievich, M.A. (2005), *Teoria rezania*. Novoe znanie, Minsk, Ukraine.
4. Dalskogo, A.M., Kosilovoi, A.G., Mescherakova, P.K. and Suslova, A.G. (2003), *Spravochnik tehnologa-mashinostroitelia*, Mashinostroenie-1, Moscow, Russia.
5. Petrakov, Y.V., Drachev, O.I. (2013), *Modelirovanie processov rezania*, THT-Press, 240p.
6. Petrakov, Y.V., Mackivski, O.S. (2015), Modeluvannia frezeruvannia kincevimi frezami, *Visnyk NTUU "KPI", seria mashinobuduvania*, 73, pp.78-83.
7. GARANT Spravochnik po obrabotke rezaniem [www.garant-tools.com](http://www.garant-tools.com).
8. Mazur, M.P., Vnukov, Y.N., and Dobroskok, V.L. (2010), *Osnovy teorii rizannia materialiv*, Novyi Svit, Lviv, 412p.
9. Lukianenko, O.L. (2014), *Vizualizacia formirovania sherohovatosty pri koncevom frezerovanii tonkostennih detaley*, *Novi materialy i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni*, 2, pp. 52-60.
10. Husu, A.P., Vitenberg, Y.R. and Palmov, V.A. (1975), *Sherohovatost poverhnostey (teoretyko-veroyatnostniy podhod)*, Nauka, Moscow, Russia.

Подана до редакції 29.02.2016