

УДК 621.924.1

Ю.В. Петраков, Н.О. Косміна

АВТОМАТИЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРИ КРУГЛОМУ ВРІЗНОМУ ШЛІФУВАННІ

Вступ

Процес круглого врізного шліфування є, як правило, завершальною (фінішною) операцією при виготовленні багатьох деталей, наприклад, у підшипниковому виробництві, і тому до вихідних характеристик цієї операції ставляться високі вимоги до продуктивності і якості обробки. Традиційно використовується такий цикл шліфування: поперечна (врізна) подача—виходжування. Останній етап становить велику частку всього циклу і є, по суті, некерованим. Відомі алгоритми керування поперечною подачею, що визначають обмеження області допустимих траєкторій керування у фазовій площині: припуск—фактична швидкість зняття припуску [1–3]. Однак керування здійснюється за поперечною подачею шліфувальної бабки у функції координати її переміщення, тобто в іншій фазовій площині, тому запропоновані алгоритми керування не можуть застосовуватись безпосередньо. Крім того, математична модель, покладена в основу визначення алгоритму керування, не враховує кількох важливих для операції круглого врізного шліфування явищ.

Постановка задачі

Мета даної статті — оптимізація циклу врізного шліфування за критерієм максимальної продуктивності.

Моделювання круглого врізного шліфування

Задача оптимального керування може бути сформульована таким чином. Потрібно вибрати таке керування V_3 у фазових координатах V_ϕ і H_ϕ , яке переводить об'єкт у заздалегідь заданий кінцевий фазовий стан $H_\phi = 0$, $(dH_\phi/dt)_\kappa = V_d$, де V_d — швидкість кругової подачі (рис. 1). На рис. 1 введено такі позначення: H_3 — заданий припуск на обробку; H_ϕ — фактична поточна величина припуску; V_ϕ — фактична швидкість зняття припуску. Існує множина керувань, яким відповідають траєкторії (лінії 3) такого переходу у фазовій площині. Для оптимального керування необхідно, щоб перехідний процес був у певному розумінні найкращим, тобто виконувався за мінімальний час.

Очевидно, оптимальним буде такий алгоритм керування V_3 , який забезпечує рух за фазовою тра-

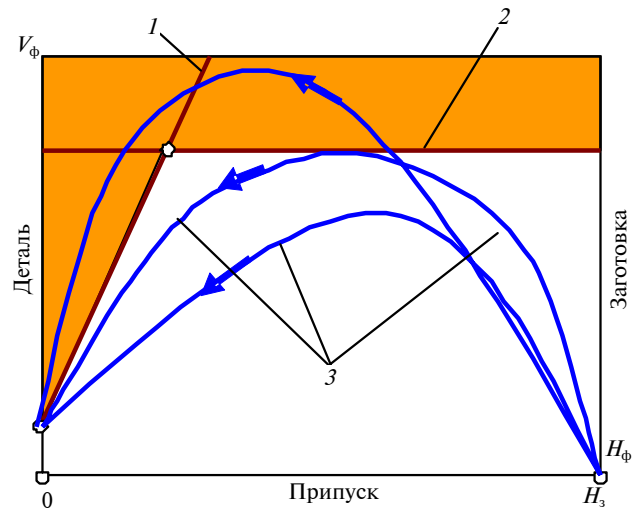


Рис. 1. До задачі оптимального керування

екторією, максимально наближеною до обмежень (лінії 1 і 2) і розташованою в допустимій області. Закон керування V_3 повинен мати, як мінімум, три етапи, що забезпечують відповідно режим врізання, режим усталеного шліфування ($V_\phi = V_m$ — лінія 2, де V_m — максимально допустима поперечна подача) і режим закінчення процесу (V_ϕ змінюється за межею припалів, лінія 1).

Розв'язання задачі визначення оптимального алгоритму керування процесом шліфування можна проводити тільки на основі його математичної моделі, що максимально адекватно визначає процес.

Математичну модель процесу круглого врізного шліфування слід розробляти на основі функціональної схеми, побудованої з використанням системного підходу. На функціональній схемі (рис. 2) використані такі позначення: $D_{\text{заг}}$ — вихідний діаметр заготовки; $D_{\text{заг1}}$ — поточний діаметр заготовки; τ — час одного оберту деталі; s — оператор Лапласа; D_κ — вихідний діаметр шліфувального круга; P_y — нормальна складова сили різання; δ_y — помилка переміщення.

Поперечна подача V_3 на врізання задається відповідним приводом шліфувальної бабки. Внаслідок процесу різання і появи сили різання виникає пружна деформація технологічної оброблюваної системи (ТОС), яка призводить до того, що фактична поперечна подача V_ϕ відрізняється від заданої V_3 . До того ж, через накопичення пружної деформації виникає ефект запізнювання: шар припуску, не зрізаний на одному оберті деталі, сприймається на наступному оберті як збільшення заданої глибини різання. Цей ефект описується в математичній моделі за допомогою запізнюючого елемента з передавальною функцією $e^{-\tau s}$.

Дослідження процесу шліфування [2] дозволили визначити інтегральний показник, за яким

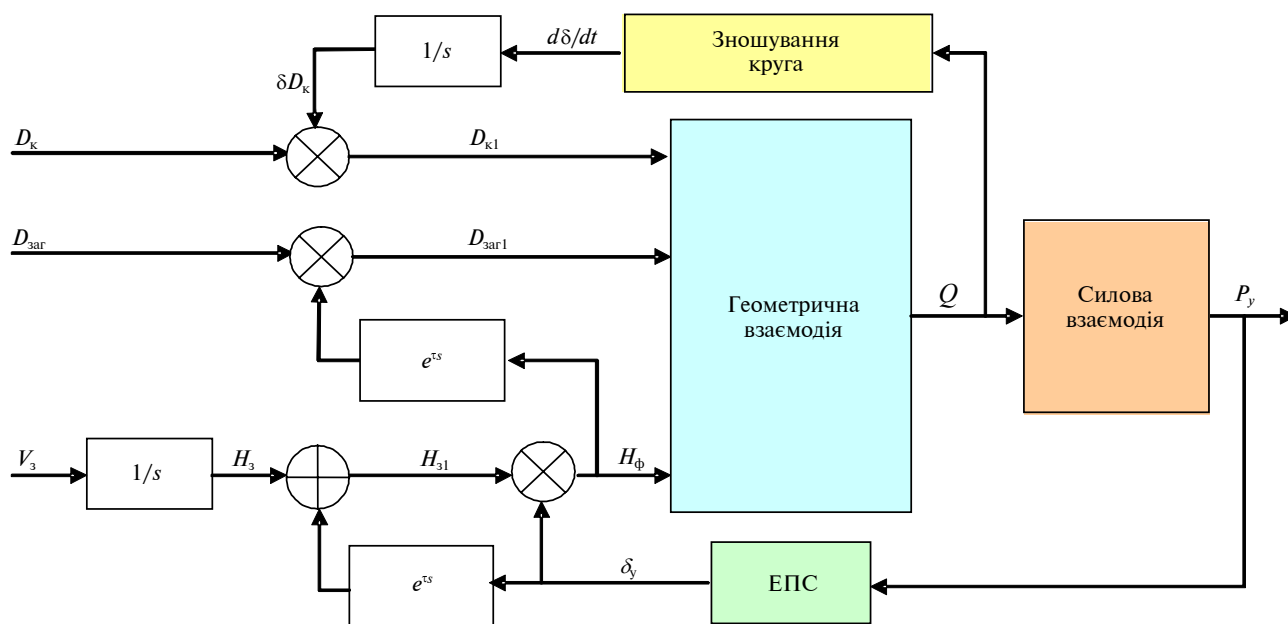


Рис. 2. Функціональна схема круглого врізного шліфування. ЕПС – еквівалентна пружна система

можна оцінювати як інтенсивність самого процесу, так і якість обробленої поверхні. Таким показником є швидкість зняття припуску, яку доцільніше всього вимірювати її аналогом, що має розмірність $\text{мм}^2/\text{рад}$ при обробці в полярній системі координат (кругле шліфування). Цей параметр не залежить від режиму шліфування і визначається виключно за геометричною взаємодією вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга і заготовки. Для переходу до швидкості зняття припуску достатньо її аналог помножити на ширину (висоту чи довжину) шліфування і швидкість переміщення периферії різальної інструментальної поверхні по оброблюваному контуру (розмірність швидкості – рад/с), в результаті матимемо традиційну розмірність швидкості зняття припуску $\text{мм}^3/\text{с}$.

Отже, математичний зміст блока геометричної взаємодії на рис. 2 можна визначити із схеми, наведеної на рис. 3 для шліфування довільної поверхні. На схемі зображено два положення периферії шліфувального круга (дуга 1) при формоутворенні контуру деталі (дуга 2), що відрізняються малим переміщенням $\delta\varphi$ по еквідистанті (лінія 3).

Із схеми видно, що швидкість зняття припуску можна оцінювати її аналогом

$$Q = \lim_{\delta\varphi \rightarrow 0} \frac{\delta F}{\delta\varphi}, \quad (1)$$

де δF – площа фігури AA_1B_1B , що визначає переріз шару, який зрізується при елементарному переміщенні круга по еквідистанті.

Швидкість зняття припуску знаходиться за формулою

$$Q_v = QV_3B, \quad (2)$$

де V_3 – швидкість руху за координатою, що задає; B – ширина шліфування.

Оскільки товщина зрізаного шару значно менша за діаметр круга, а також враховуючи, що $\delta\varphi \rightarrow 0$, з великим ступенем точності площу зрізу можна замінити площею трикутника із сторонами

$$AB = L_k \text{ і } AB_1 = L_k + \delta L_k + S\delta\varphi r_c,$$

де L_k – довжина лінії контакту шліфувального круга і заготовки; δL_k – прирощення довжини лінії контакту; S – контурна подача, r_c – середній полярний радіус контуру деталі на ділянці AA_1 .

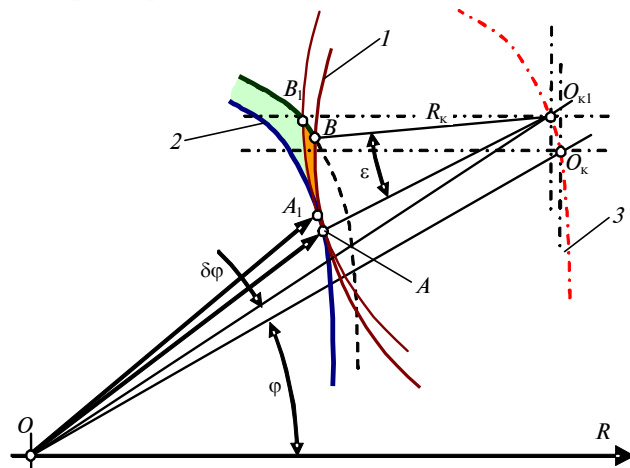


Рис. 3. Схема зняття припуску

З геометричних співвідношень схеми випливає, що кут між сторонами цього трикутника дорівнює $\delta\varphi$, а площа становить

$$\delta F = 0,5 L_k (L_k + \delta L_k + S \delta \varphi r_c) \sin \delta \varphi.$$

Тепер із залежності (1) із врахуванням, що при $\delta\varphi \rightarrow 0 \sin \delta\varphi \approx \delta\varphi$ і відкидаючи члени вищого порядку малості, отримуємо

$$Q = 0,5 L_k^2. \quad (3)$$

Одержана залежність (3) має універсальний характер, тобто може використовуватись для розрахунків при обробці будь-яких 2D-поверхонь як у полярній, так і в декартовій системах координат.

Подальше вдосконалення математичної моделі полягає у врахуванні обертання деталі при шліфуванні, що змінює траєкторію відносного руху різальної поверхні шліфувального круга в тілі заготовки, а значить, і фактичну швидкість зняття припуску. Із схеми зняття припуску при круглому врізному шліфуванні (рис. 4) видно, що траєкторія формоутворювальної точки B шліфувального круга рухається у відносному русі за спіраллю Архімеда. Тому на першому оберті заготовки (при її ідеально циліндричній формі) глибина різання наростає від нуля до величини добутку поперечної подачі на час одного оберту. Далі глибина різання стабілізується.

Швидкість зняття припуску при круглому врізному шліфуванні залежить від геометричних розмірів шліфувального круга, деталі і фактич-

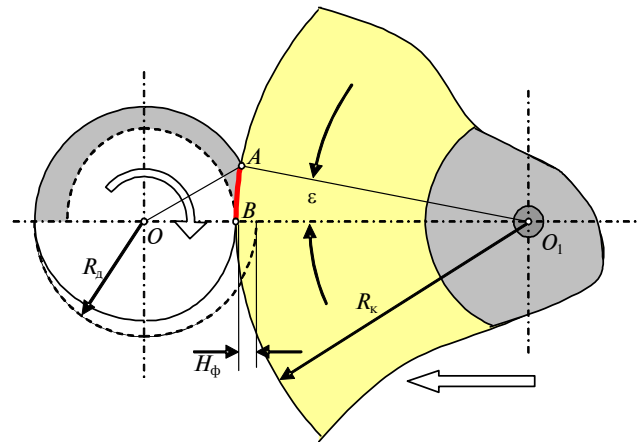


Рис. 4. Схема зняття припуску при круглому врізному шліфуванні

ної глибини різання H_ϕ (див. рис. 4). З трикутника OAO_1 за теоремою косинусів маємо

$$R_d^2 = R_k^2 + (R_k + R_d - H_\phi)^2 - 2R_k(R_k + R_d - H_\phi)\cos\varepsilon. \quad (4)$$

Таким чином, може бути обчислений кут ε , який визначає дугу контакту шліфувального круга і заготовки:

$$\cup AB = R_k \varepsilon = L_k. \quad (5)$$

Тепер швидкість зняття припуску можна розраховувати за залежністю (3).

Для врахування динамічних явищ, притаманних будь-якій пружній системі верстата, необхідно щонайменше розглянути одномасову динамічну модель (рис. 5).

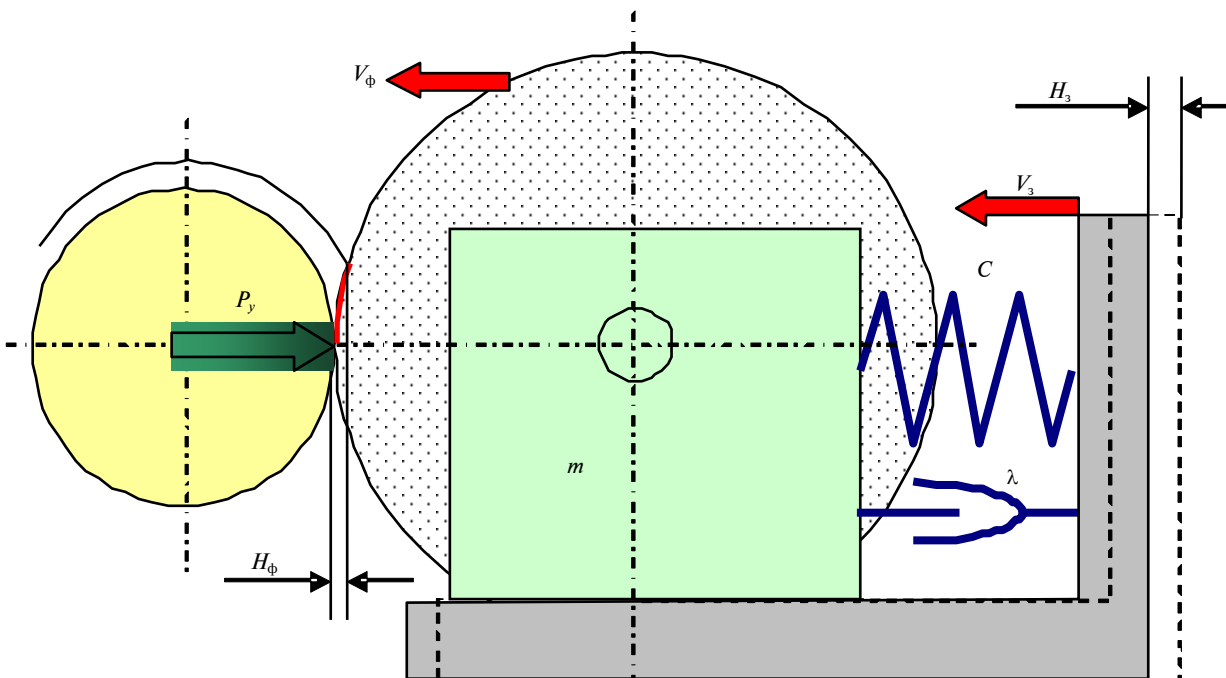


Рис. 5. Динамічна модель

Рівняння руху такої системи, яка знаходиться під дією кінематичного і силового збудження, має вигляд

$$\begin{cases} \frac{dV_\phi}{dt}m + (V_\phi - V_3)\lambda_y + (H_\phi - H_3)c = P_y, \\ V_\phi = \frac{dH_\phi}{dt}, \\ V_3 = \frac{dH_3}{dt}, \end{cases} \quad (6)$$

де V_ϕ , V_3 – відповідно фактична і задана поперечна подача; H_ϕ , H_3 – відповідно фактична і задана глибина різання (переміщення); m , λ_y , c – зведені маса, коефіцієнт в'язкого тертя і жорсткість; P_y – нормальна складова сили різання.

Сила різання при шліфуванні (її складова P_y) залежить від матеріалу деталі, шліфувального круга, швидкості зняття припуску і режиму різання. Ця залежність має емпіричний вигляд:

$$P_y = C_p(QV_d)^\alpha B, \quad (7)$$

де C_p , α – емпіричний коефіцієнт і показник степеня; V_d – швидкість кругової подачі; B – ширина шліфування (деталі).

Процес розмірного зношування шліфувального круга звичайно залежить від багатьох факторів, а залежність швидкості зношування $d\delta_k/dt$ від швидкості Q зняття припуску має нелінійний характер (крива 1 на рис. 6). Тут δ_k – зміна діаметра шліфувального круга в результаті розмірного зношування. Таким чином, ця залежність може бути лінеаризована на двох ділянках (лінії 2 на рис. 6) двома лінійними рівняннями, які визначаються за формулами

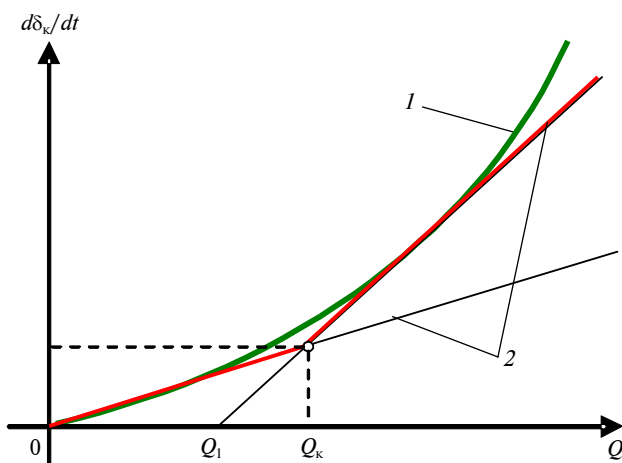


Рис. 6. Залежність зношування шліфувального круга від швидкості зняття припуску

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_k}{dt} &= a_1 Q, & 0 \leq Q \leq Q_k, \\ \frac{d\delta_k}{dt} &= a_2(Q - Q_1), & Q > Q_k, \end{aligned} \quad (8)$$

де a_1 , a_2 – коефіцієнти нахилу ліній 2 на рис. 6.

Розв'язання задачі

Аналіз розробленої математичної моделі процесу круглого врізного шліфування і формулювання задачі оптимізації свідчить про те, що таку задачу можна віднести до класу задач варіаційного обчислення. Дійсно, з нескінченної множини керувань треба знайти таку функцію керуючого впливу (поперечної подачі), яка забезпечує траєкторію руху на фазовому просторі: швидкість зняття припуску–припуск, що максимально наближена до обмежень. При цьому шукана функція розміщується в іншому фазовому просторі: поперечна подача–переміщення шліфувальної бабки.

Для розв'язання розглядуваної варіаційної задачі можна скористатися додатковими умовами, які випливають із суті процесу керування: кожному керуючому впливові у вигляді зміни поперечної подачі відповідає своя траєкторія залежності фактичної швидкості зняття припуску від величини припуску. Отже, процес є однозначно керованим. Крім того, завдяки наявності математичної моделі процесу з'являється можливість спостерігати його реакцію на кожне керування, тобто процес є таким, що спостерігається. І, нарешті, найважливішою умовою є наявність меж області можливих значень розташування траєкторій фактичної швидкості зняття припуску, які можна прийняти як ліміт варіацій.

На основі аналізу умов задачі було розроблено числовий метод її розв'язання з використанням принципу функціонування систем автоматичного керування (САК) із зворотним зв'язком. Цей метод полягає в організації алгоритму обчислень у такий спосіб, щоб він функціонував аналогічно замкненій САК, що як помилку використовує різницю між межею області і траєкторією фактичної швидкості зняття припуску. Таким чином, застосовується відомий принцип дії замкнених САК: автоматично зводити помилку до нуля чи зберігати її в заздалегідь заданих малих відхиленнях.

При створенні такого алгоритму обов'язково необхідно враховувати те, що помилка вимірюється у функції фактичного припуску, а використовується для керування у функції перемі-

щення шліфувальної бабки. Відомо, що ці дві змінні зв'язані між собою математичною моделлю процесу шліфування.

Алгоритм, узагальнену блок-схему якого наведено на рис. 7, організує ітераційний процес наближення первісно заданого керування $V_3(H_3)$ до оптимального.

На кожній ітерації в результаті моделювання процесу шліфування із заданим керуванням виконується обчислення фактичної швидкості зняття припуску у функції фактичного припуску $V_\phi(H_\phi)$. Крім того, на кожному кроці моделювання визначається функція помилки залежно від фактичного припуску порівнянням меж $D(H_\phi)$ області допустимих керувань з фактичною траєкторією і різниця δH між фактичним припуском і заданим переміщенням шліфувальної бабки. В результаті обчислюється масив функції помил-

ки вже залежно від заданого переміщення шліфувальної бабки $\delta V(H_3)$, що дозволяє через коефіцієнт $k_{3.3}$ зворотного зв'язку коректувати задане первісно керування на наступній ітерації тощо.

Розроблений алгоритм покладено в основу прикладної програми, головний інтерфейс якої наведено на рис. 8. Лінією 1 позначено межі області допустимих керувань у фазовій площині: швидкість зняття припуску–припуск. Виконано перший цикл обчислень: лінія 2 – первісно прийнятий закон керування (незмінна поперечна подача), якому відповідає траєкторія 3 швидкості зняття припуску. Очевидно, що таке керування не тільки не оптимальне, але й призводить до браку за припалами.

Процес автоматичного наближення траєкторії керування до оптимальної проілюстровано на рис. 9. Після п'яти ітерацій (рис. 9, а) траєкторія керування (лінія 1) автоматично змінилась, що спричинило наближення траєкторії зняття припуску (лінія 2) до меж області допустимих керувань. Час циклу скоротився до 6с, проте таке керування все ще не є оптимальним, оскільки призводить до браку за припалами. Необхідно продовжити ітерації до стану, показаного на рис. 9, б, коли фактична траєкторія зняття припуску практично всюди лежить за межею області допустимих керувань, що дозволяє вважати її оптимальною. Незначні коливання на етапі врізання викликані динамічними явищами, що відбуваються в пружній ТОС і не будуть істотно впливати на процес шліфування в цілому. Таким чином, в результаті автоматично сформована оптимальна траєкторія керування, яка може бути основою для створення програми керування поперечною подачею на круглошліфувальному верстаті з ЧПУ у G-кодах.

Як показали дослідження, функціонування програми, швидкість сходження і її сталість залежать від коефіцієнта зворотного зв'язку, який має задовольняти умову $k_{3.3} < 1$. Збільшення коефіцієнта призводить до збільшення швидкості сходження, проте після деякої величини, що залежить від конкретних умов задачі, програма втрачає сталість.

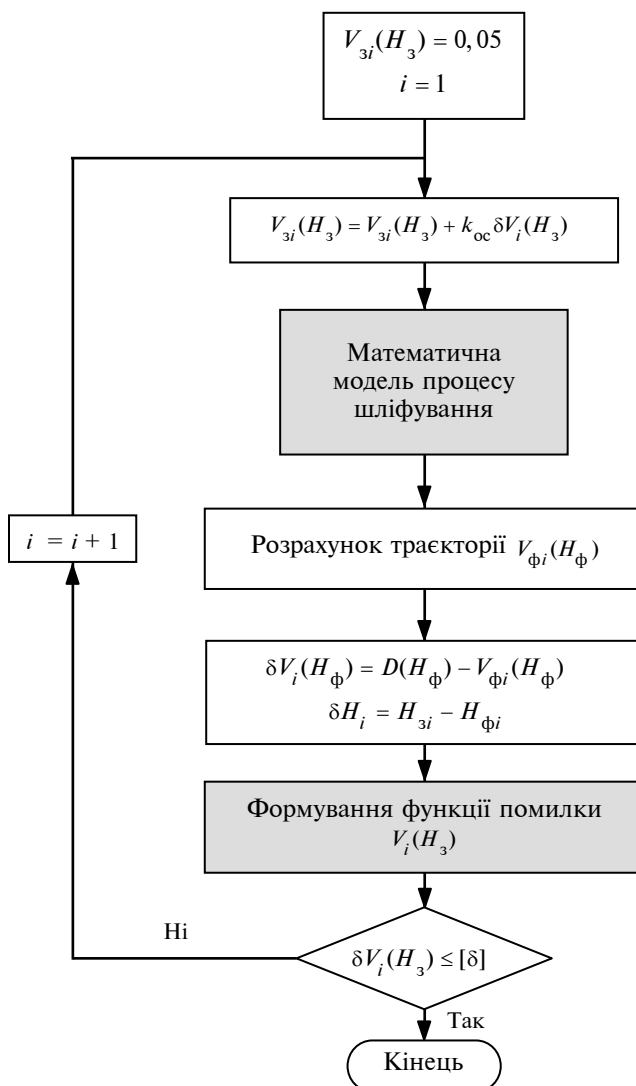


Рис. 7. Ітераційний алгоритм розв'язання варіаційної задачі

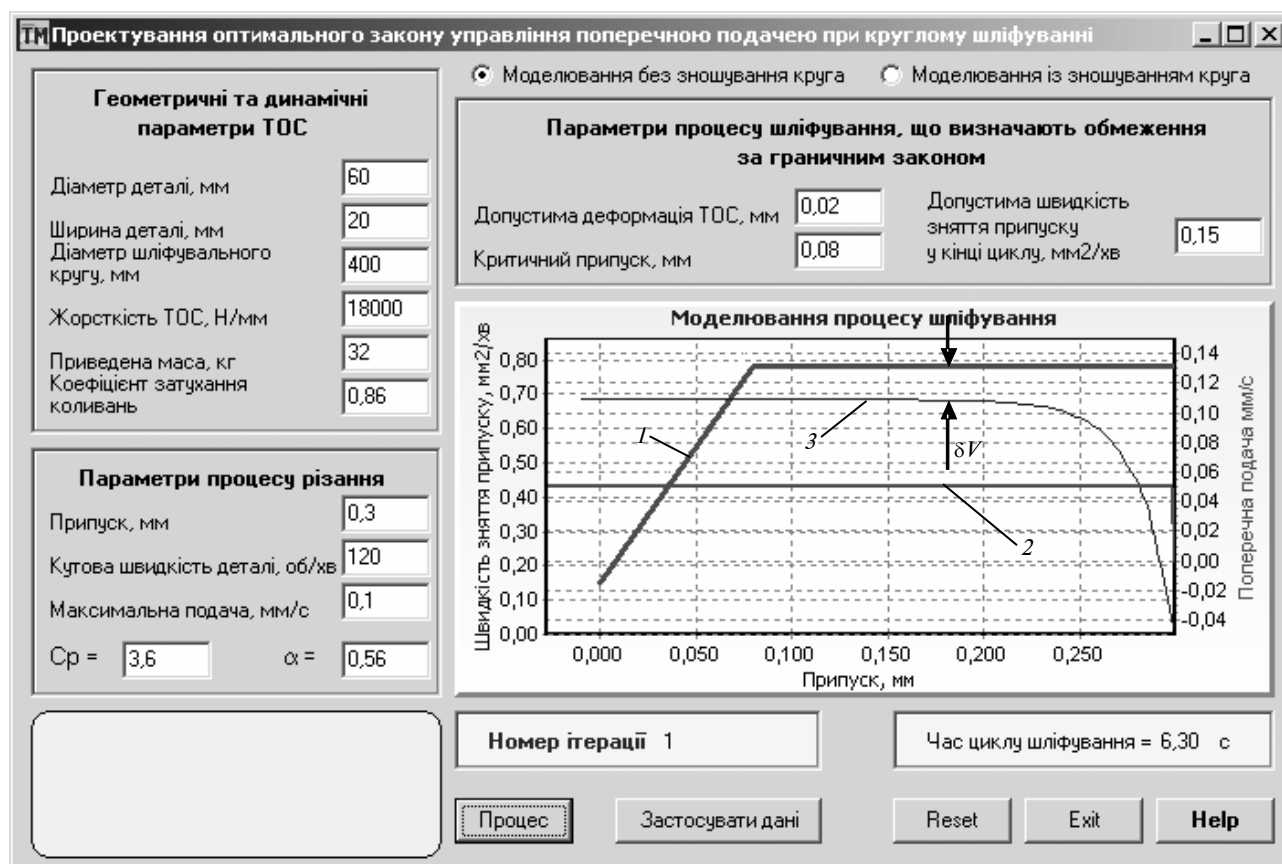


Рис. 8. Головний інтерфейс прикладної програми

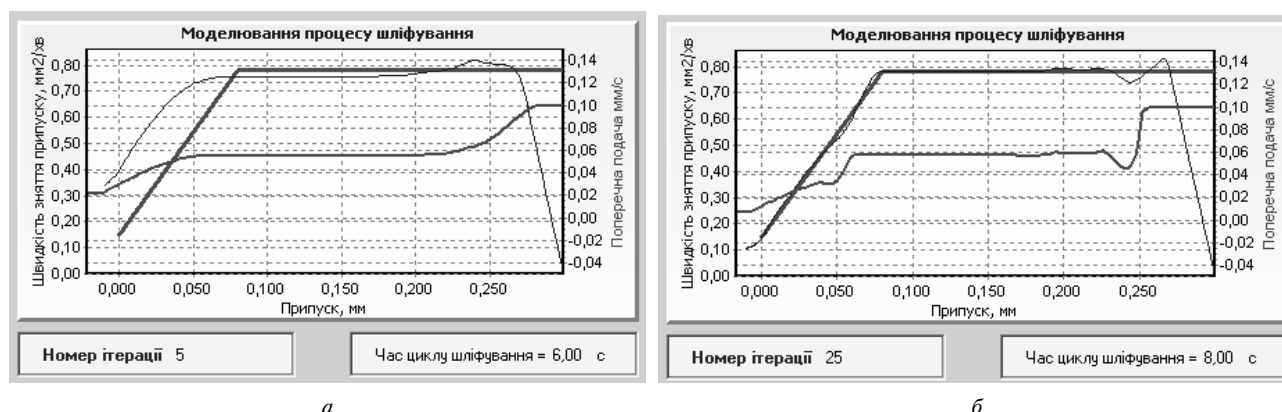


Рис. 9. Етапи ітераційного процесу

Висновки

Створена прикладна програма, в основу якої покладено розроблений алгоритм, дає можливість отримати оптимальний закон керування поперечною подачею в автоматичному режимі. Залежно від конкретних умов шліфування продук-

тивність може підвищуватись у два–чотири рази. Отримані при моделюванні результати добре корелюються з досвідом практичної роботи на шліфувальних верстатах, що дає змогу рекомендувати створену прикладну програму для впровадження у виробництво для технологічної підготовки шліфувальних операцій.

Ю.В. Петраков, Н.А. Космина

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ КРУГЛОМ ВРЕЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

Сформулирована задача оптимального управления процессом круглого врезного шлифования. Создана математическая модель процесса, которая учитывает геометрическое, силовое взаимодействие шлифовального круга и заготовки, изнашивание шлифовального круга, замкнутость и динамические свойства упругой системы станка, а также многопроходность процесса. Доказано, что задача оптимизации относится к классу вариационных задач и не может быть решена аналитическими методами. Предложен новый подход к решению задачи оптимизации за счет использования специального вычислительного алгоритма, который функционирует по принципу замкнутой системы автоматического управления. Создана прикладная программа, которая предлагается как инструмент технологической подготовки производства.

Yu.V. Petrakov, N.O. Kosmina

AUTOMATIC DESIGN OF OPTIMUM CONTROL AT ROUND INFEEED GRINDING

The study under consideration deals with the optimum control task of the round infeed grinding process. We develop the mathematical sample of the process, which takes into account geometrical, power interacting of a grinding circle and stock material, chafing of a grinding circle, closure and dynamic properties of the rig elastic-system, as well as high passability. In addition, we prove that the optimization task refers to the class of variational problems and cannot be solved employing the analytic methods. We introduce a novel approach to the solution of the optimization task, implementing a special computational algorithm, which functions according to the principle of the looped system of automatic steering. Finally, we develop the application program that can be exploited as a tool of technological preparation production.

1. *Михелькевич В.Н.* Автоматическое управление шлифованием. — М.: Машиностроение, 1975. — 304 с.
2. *Петраков Ю.В.* Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням. — К.: УкрНДІАТ, 2004. — 384 с.
3. *Петраков Ю.В., Субін А.А., Радько Є.О.* Структурно-параметрична модель врізного шліфування // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. — 2002. — № 2. — С. 76–81.

Рекомендована Радою
Механіко-машинобудівного інституту
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
3 грудня 2007 року