

Практичне заняття

Визначення оптимального режиму різання при точінні

Мета роботи: Набуття практичних навичок експериментального дослідження залежностей оптимального режиму різання від параметрів процесу точіння.

Теоретична частина

Оптимальним управлінням будемо вважати такий вплив на процес різання, який у кожний момент часу забезпечує максимум продуктивності (мінімум собівартості) при задоволенні всім умовам обмежень. У такому розумінні задача оптимізації є однокритеріальною і може бути розв'язана класичними методами нелінійного програмування, тобто можуть бути однозначно визначені оптимальні значення впливів, що управляють. Під впливами, що управляють, звичайно розуміють повздовжню подачу на оберт заготовки і швидкість різання, а глибину різання вважають головним збуренням. Таким чином, теоретично, для заданих умов токарного оброблення існують такі постійні значення повздовжньої подачі на оберт заготовки і швидкості різання, які приводять до максимуму продуктивності.

Однак, на практиці, при виконанні будь-якого процесу різання жоден з його параметрів не залишається постійним. Це визначається безперервною модифікацією як зовнішніх збурень, так і характеристик самої технологічної оброблювальної системи (ТОС). Наприклад, при точінні циліндричної поверхні відбуваються випадкові зміни припуску, твердості, зона обробки переміщається вздовж заготовки, внаслідок чого змінюється точка прикладання сили в пружній ТОС та пружні деформації, з течією часу зношується інструмент, відбуваються зміни температури зони різання, верстату тощо. Тому в кожний момент часу процесу для підтримання його вихідних характеристик на оптимальному рівні необхідно безперервно визначати нові оптимальні величини впливів, що управляють і діяти ними на процес різання.

Таким чином, оптимальне управління повинно бути перманентним, урахувати змінні умови різання і виконуватись автоматично. Для задоволення таким вимогам найбільш підходять САУ, що управляють подачею, швидкістю різання, а інколи і глибиною різання.

Основні труднощі реалізації оптимального управління за допомогою простої замкненої САУ зумовлені принциповою неможливістю створення вимірювального приладу продуктивності чи собівартості щоб застосовувати його у якості приладу зворотного зв'язку. Тому оптимально управляти процесом різання можна тільки на основі оцінки допоміжних параметрів, зв'язаних з необхідним критерієм оптимальності відповідною апріорною математичною моделлю. Як правило, таким допоміжним параметром процесу є потужність різання. Інколи САУ оптимального управління включає до себе додаткові канали інформації про процес різання: темпи зношування інструменту, температуру зони різання, тощо [10].

Найбільш раціонально використання принципів оптимального управління на верстатах з ЧПУ, тому що:

- ✓ по-перше, саме тут можна отримати відчутний економічний ефект від оптимізації, оскільки верстато-хвилина є коштовною і, внаслідок автоматизації допоміжних рухів, відсоток часу обробки у загальному технологічному часі виготовлення деталі збільшується;
- ✓ по-друге, завдяки високій оснащеності таких верстатів як засобами обчислювальної техніки, так і відповідними регульованими приводами для виконання головного і формоутворюючих рухів, спрощується реалізація відповідної САУ оптимального управління.

Таким чином, у сучасних САМ-системах технологічного підготовки виробництва найбільш раціональним є оптимальне управління, що реалізоване програмними засобами. Взагалі, для оцінки збурень та одержання інформації про фактичний хід процесу різання в САУ оптимального управління застосовують різноманітні підходи, які основані на непрямому вимірюванні припуску [20], температури зони різання [10], темпів зношування інструменту [17]. Найбільш близьким до запропонованої САУ є метод, що оцінює процес за поточним значення перетину шару припуску, що зрізається.

Тому програмне забезпечення САУ оптимального управління повинно мати наступну структуру (рис.8.1).

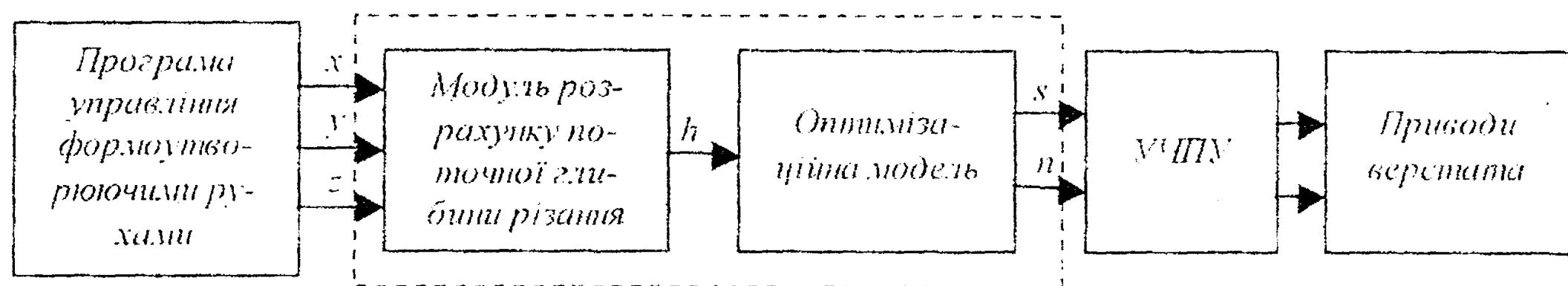


Рис.8.1. Структура САУ оптимального управління

Первинна інформація про хід процесу різання, крім констант, що вводяться раніше, отримується з модулю розрахунку поперечної глибини різання, який зв'язаний з програмою управління формоутворюючими рухами. Далі, у відповідності до оптимізаційної математичної моделі процесу різання визначаються оптимальні величини впливів, що управляють (наприклад, подачі і швидкості різання). Визначені величини поступають на модуль програмного управління, що виробляє команди для відповідних приводів верстата.

Таким чином, основою будь-якої САУ оптимізації процесу різання є його оптимізаційна математична модель, що зв'язує критерій оптимізації з керуючим впливом - подачею і швидкістю різання. В результаті розв'язання задачі оптимізації знаходять керуючий вплив, що забезпечує максимум продуктивності або мінімум собівартості при безумовному виконанні вимог обмежень за якістю обробки. Крім традиційних критеріїв оптимізації (продуктивність чи собівартість) в залежності від результатів техніко-економічного аналізу застосовують критерій максимальної інтенсивності зняття припуску. Часто на виробництві ставиться таке завдання - досягнення максимальної продуктивності або мінімальної собівартості при заданих значеннях стійкості інструменту.

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.

Для випадку обробки різанням на токарному верстаті за один прохід з постійною глибиною різання, що дорівнює припуску на обробку (ідеальний випадок), режим різання буде оптимальним при такому поєднанні подачі і швидкості різання, коли основний технологічний час буде мінімальним. Таке оптимальне рішення знаходять, відшукуючи такі невід'ємні значення управляючих впливів (подачі S і частоти обертання n шпинделя) при задоволенні всім обмеженням, що доставляють мінімум критерію оптимальності - технологічному часу t_0 .

Таким чином, для випадку повздовжнього точіння оптимізаційна математична модель може бути виражена наступною системою рівнянь і нерівностей.

Зв'язок між управліннями S і n та періодом T стійкості інструмента, що визначають його різальну спроможність (іноді така властивість інструменту називається роботоздатністю), одержують за відомою з теорії різання залежністю:

$$V = \frac{\pi D n}{1000} = \frac{C_v k_v}{T^m h^{x_v} S^{y_v}},$$

звідки

$$n S^{y_v} = \frac{318 C_v k_v}{D T^m h^{x_v}}. \quad (8.1)$$

Оскільки всі залежності, що складають математичну модель, є емпіричними, слід не забувати про вимірності вхідних до них фізичних величин. Традиційно ці вимірності не відповідають СІ-вимірностям. Так, у залежності (8.1) частота обертання - n (об/хв), подача - S (мм/об), глибина різання - h (мм), період стійкості - T (хв), діаметр заготовки - D (мм).

В математичній моделі (8.1) необхідно ураховувати відомі з практики оброблення різанням залежності стійкості різця не тільки від матеріалу заготовки та інструменту, а й геометричних параметрів різальної частини різця у плані. Вплив головного і допоміжного кутів у плані різця відображається відомими [1] залежностями для допустимої швидкості різання:

$$V = \frac{C_\varphi}{\varphi^u}, \quad V = \frac{C_{\varphi 1}}{\varphi^{u1}}.$$

Такі залежності входять до математичної моделі процесу різання, а їх вплив на обмеження (8.1) виконується за рахунок коефіцієнту k_v , величина якого розраховується за конкретними умовами оброблення.

Наступне обмеження – за потужністю різання N_p (кВт):

$$N_p = \frac{P_z \pi D n}{1000 \cdot 6 \cdot 10^4} = \frac{C_p h^{x_p} S^{y_p} k_p \pi D n}{6 \cdot 10^7} \leq N_{cm} \eta,$$

звідки

$$n S^{y_p} \leq \frac{1.91 \cdot 10^7 N_{cm} \eta}{C_p h^{x_p} k_p D}, \quad (8.2)$$

де N_{cm} - ефективна потужність верстату у кВт, η – коефіцієнт корисної дії, C_p , k_p , x_p , y_p – коефіцієнти і показники емпіричної залежності сили різання від режиму та умов обробки.

Подача, що допускається необхідною шорсткістю Rz обробки може бути визначена за детермінованою складовою профілю шорсткості обробленої поверхні, яка, в свою чергу, визначається за геометричними залежностями формування мікронерівностей поверхневого шару деталі для кожного з чотирьох можливих випадків утворення верхівки

профілю [1]. Такі випадки визначаються співвідношеннями між геометричними параметрами вершини різця у плані (головний φ , допоміжний φ_1 , кути у плані і радіус r округлення вершини різця у плані) і подачею S на оберт заготовки.

При $\varphi < \arcsin(S/2r)$ і $\varphi_1 < \arcsin(S/2r)$ верхівка профілю формується перетином головного і допоміжного різальних лез інструменту, при $\varphi > \arcsin(S/2r)$ і $\varphi_1 < \arcsin(S/2r)$ верхівка профілю формується перетином допоміжного різального леза і радіусною частиною вершини інструменту, при $\varphi < \arcsin(S/2r)$ і $\varphi_1 > \arcsin(S/2r)$ верхівка профілю формується перетином головного різального леза і радіусною частиною вершини інструменту, а при $\varphi < \arcsin(S/2r)$ і $\varphi_1 < \arcsin(S/2r)$ верхівка профілю формується перетином виключно радіусної частиною вершини інструменту. Таким чином, умова визначення допустимої (за шорсткістю) подачі входить сама подача, що унеможливує отримання відповідної аналітичної залежності.

Для розв'язання такої задачі доцільно використовувати чисельний метод, який побудований за ітеративним принципом наближення із заданим кроком до розв'язку у відповідності до алгоритму, блок-схема якого представлена на рис. 8.2.

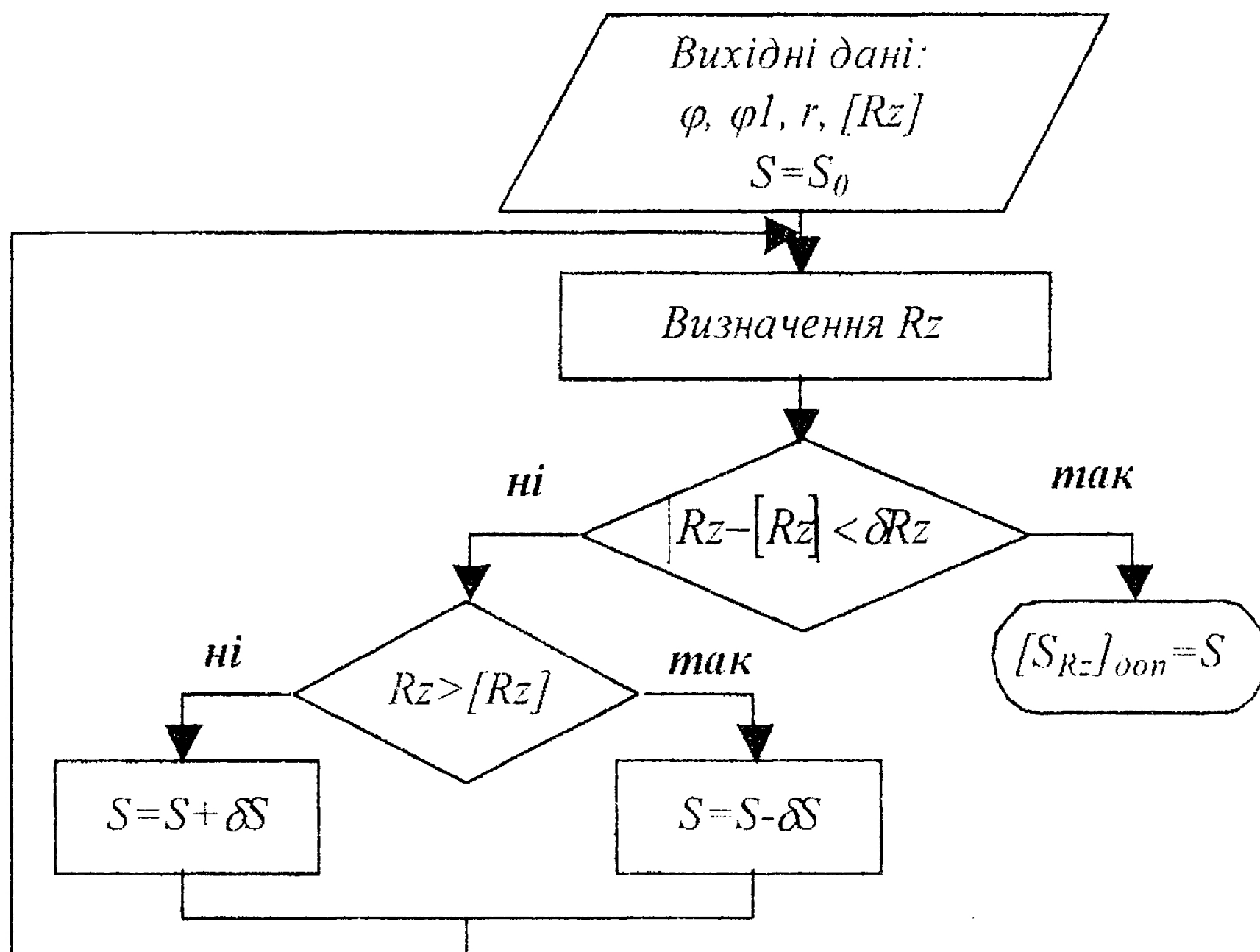


Рис.8.2. Блок-схема алгоритму визначення подачі, допустимої за шорсткістю обробленої поверхні

Визначення параметру Rz шорсткості поверхні на кожній ітерації виконується за чисельним методом, який був розроблений у лаборато-

рній роботі №7 (дивись рис.7.5). Таким чином, обмеження за допустимою шорсткістю обробленої поверхні деталі має вигляд:

$$S \leq [S_{R_z}]_{\text{доп}}. \quad (8.3)$$

Наступне обмеження, що накладається на повздовжню подачу, обирається з умов міцності та жорсткості ТОС. Наприклад, подача за максимальною силою P_n , що забезпечує привод подачі верстату, може бути розрахована за наступною залежністю:

$$[S_P]_{\text{доп}} = \left(\frac{2P_n}{C_p h^{X_p} k_p} \right)^{\frac{1}{Y_p}}.$$

Подача, що допускається, вибирається як найменша з подач, що розраховані за міцністю інструменту $[S_I]_{\text{доп}}$ або тяговою силою механізму подач верстату $[S_P]_{\text{доп}}$:

$$S \leq \min \{ [S_P]_{\text{доп}}, [S_I]_{\text{доп}} \}. \quad (8.4)$$

Конструктивні обмеження, що визначаються за можливостями металорізального верстату:

діапазон повздовжніх подач:

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max}, \quad (8.5)$$

діапазон частот обертання шпинделя:

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}. \quad (8.6)$$

В якості оцінної функції за критерієм максимальної продуктивності приймають

$$f = nS \rightarrow \max, \quad (8.7)$$

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

Одержана математична модель (8.1 – 8.7) складає ядро прикладної програми «Оптимізація_точіння», за допомогою якої виконується дослідження.

Практична частина

Для виконання роботи використовується прикладна програма, інтерфейс якої представлений на рис.8.3. Інструкції та пояснення для роботи з програмою містяться у самій програмі і з'являються на екрані монітора при натисканні кнопки Help.

Після активації програми, введення вихідних даних у відповідності до варіанту і натискання кнопки «Застосувати дані» у графічному вікні інтерфейсу з'являється область D допустимих значень частоти

обертання шпинделя і подачі, що відповідає представленим на інтерфейсі вихідним даним процесу різання. Ця область утворена перетином наступних обмежень: 1- мінімальна подача, 3 – мінімальна частота обертання шпинделя, 5 – мінімальна подача за шорсткістю поверхні, 7 – обмеження за стійкістю інструменту, 8 – обмеження за потужністю верстату. Лінія 9 відображає оцінну функцію оптимізації за максимальною продуктивністю і задовольняє залежності (8.7).

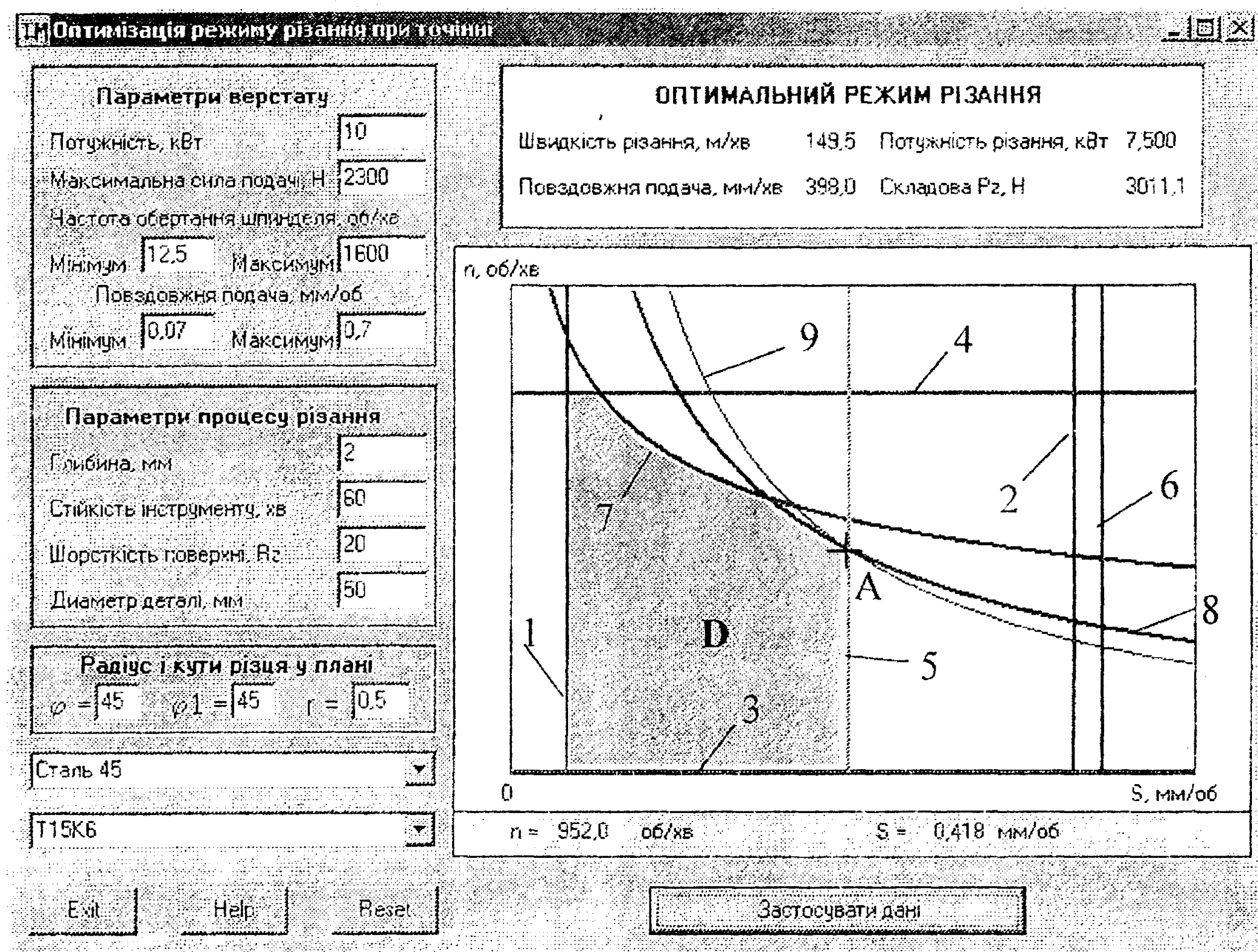


Рис.8.3. Інтерфейс прикладної програми оптимізації точіння

Лінія 9 з'являється у графічному вікні інтерфейсу і пересувається там за перехрестям мишки. Тому, для визначення координати області допустимих значень необхідно перевести мишку так, щоб лінія максимальної продуктивності була дотичною до найбільш віддаленої від початку координат вершини області допустимих значень, а перехрестя мишки співпадало з такою вершиною.

Після натискання на ліву клавішу мишки, що знаходиться у такому положенні, на інтерфейсі з'являються оптимальні величини режиму різання. Визначаються наступні складові режиму різання та його головні характеристики: частота обертання шпинделя (896 об/хв), подача на оберт (0,453 мм/об), швидкість різання (140,7 м/хв), повздовжня подача (406,0 мм/хв), потужність різання (7,5 кВт), складова P_z сили різання (3198,4 Н).

Звертаємо увагу на те, що у відповідності до прийнятого критерію оптимальності – максимальна продуктивність – його величину зручно оцінювати безпосередньо за величиною повздовжньої подачі.

Обмеження, які накладаються гранично допустимою силою або моментом різання, що визначаються як найменше значення, що розраховане виходячи з умов міцності інструменту чи механізму подач металорізального верстату (лінія 6 на рис. 8.3) та обмеження за максимальними частотою обертання шпинделя і максимальною подачею (лінії 4 і 2 відповідно) розташовані так, що не утворюють область допустимих значень режиму різання. Проте, зі зміною вихідних даних процесу і, зокрема, глибини різання, обмеження можуть мінятися місцями. Відповідно вершина A , що відповідає оптимальному режиму різання може утворюватись перетином різних обмежень.

Представлена програма може складати основу модулю “оптимізаційна модель” САУ оптимізації (дивись рис.8.1). У такому разі вона повинна бути доповнена процедурою автоматичного знаходження оптимальної вершини A області допустимих значень режиму різання.

Для всіх варіантів індивідуального завдання, вихідні дані для яких наведені у табл. 8.9, експериментально визначити:

- ✓ залежність частоти обертання шпинделя і подачі на оберт від глибини різання;
- ✓ залежність потужності різання та складової P_z сили різання від глибини різання;
- ✓ залежність критерію оптимальності (оцінювати за величиною повздовжньої подачі) та швидкості різання від глибини різання;
- ✓ залежність критерію оптимальності (оцінювати за величиною повздовжньої подачі) та швидкості різання від головного кута у плані різця.

У якості прикладу виконання роботи нижче представлений хід досліджень для вихідних даних, що зазначені у вікнах головного інтерфейсу програми на рис.8.3.

Для виконання експериментальних досліджень за першими трьома завданнями, які виконуються у функції глибини різання, перед активацією прикладної програми необхідно скласти таблицю експериментальних даних, визначивши діапазон і крок зміни глибини різання (дивись табл.8.1).

На рис.8.4 представлений стан області D допустимих значень частоти обертання шпинделя і повздовжньої подачі при проведенні експериментальних досліджень за даними таблиці 8.1.

Тут прийняті ті ж самі позначення, що і на рис.8.3: лінія 1 і 2 – обмеження за мінімальною і максимальною подачею, лінія 3 і 4 – об-

меження за мінімальною і максимальною частотою обертання шпинделя, лінія 5 – обмеження подачі за заданою шорсткістю поверхні, лінія 6 – обмеження подачі за допустимою силою механізму подачі привода верстата, лінія 7 – обмеження за стійкістю інструменту, лінія 8 – обмеження за потужністю верстату. Лінія 9 відображає оцінну функцію оптимізації за максимальною продуктивністю.

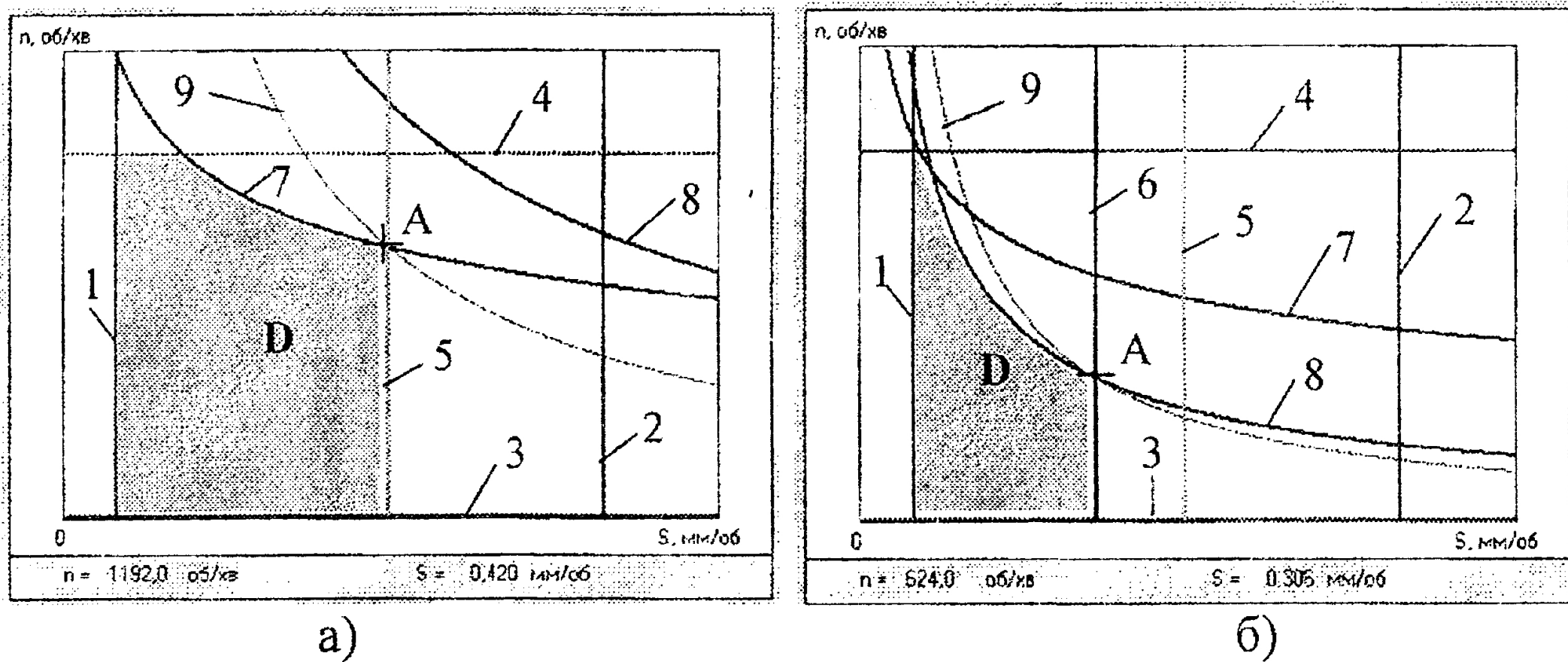


Рис.8.4. Результати визначення оптимального режиму різання:
а) – при глибині різання 1 мм, б) – при глибині різання 4 мм

Видно, що із зміною глибини різання вершина *A* області допустимих значень, що відповідає оптимальному (за продуктивністю) режиму різання утворюється перетином різних обмежень. Так, при глибині різання 1мм ця вершина утворена обмеженнями за стійкістю інструменту і за необхідною шорсткістю поверхні, а при глибині 4мм – обмеженнями за потужністю різання і максимально допустимою силою привода подачі.

Отримані експериментальні дані, що відповідають оптимальному режиму різання при різних величинах глибини різання представлені у таблиці 8.1.

Таблиця 8.1. Експериментальні дані

№	h, мм	$n_{\text{опт}}$, об/хв	$S_{\text{опт}}$, мм/об	$N_{\text{різ}}$, кВт	$P_z, \text{Н}$	$S_{\text{хв}}$, мм/хв	V , м/хв
1	0,5	1320	0,420	2,80	810	554	207
2	1,0	1192	0,420	4,88	1565	501	187
3	1,5	1120	0,420	6,75	2301	470	176
4	2,0	952	0,418	7,50	3011	398	150
5	2,5	768	0,418	7,48	3722	321	121
6	3,0	648	0,418	7,51	4426	271	102
7	3,5	624	0,362	7,51	4600	226	98
8	4,0	624	0,306	7,52	4603	191	98

За експериментальними даними, з використанням пакету Excel побудовані графіки відповідних залежностей, що представлені на рис.8.5, рис.8.6 і рис.8.7. З аналізу експериментальних результатів можна зробити висновки щодо законів управління за якими досягається оптимальний режим різання при зміні глибини різання.

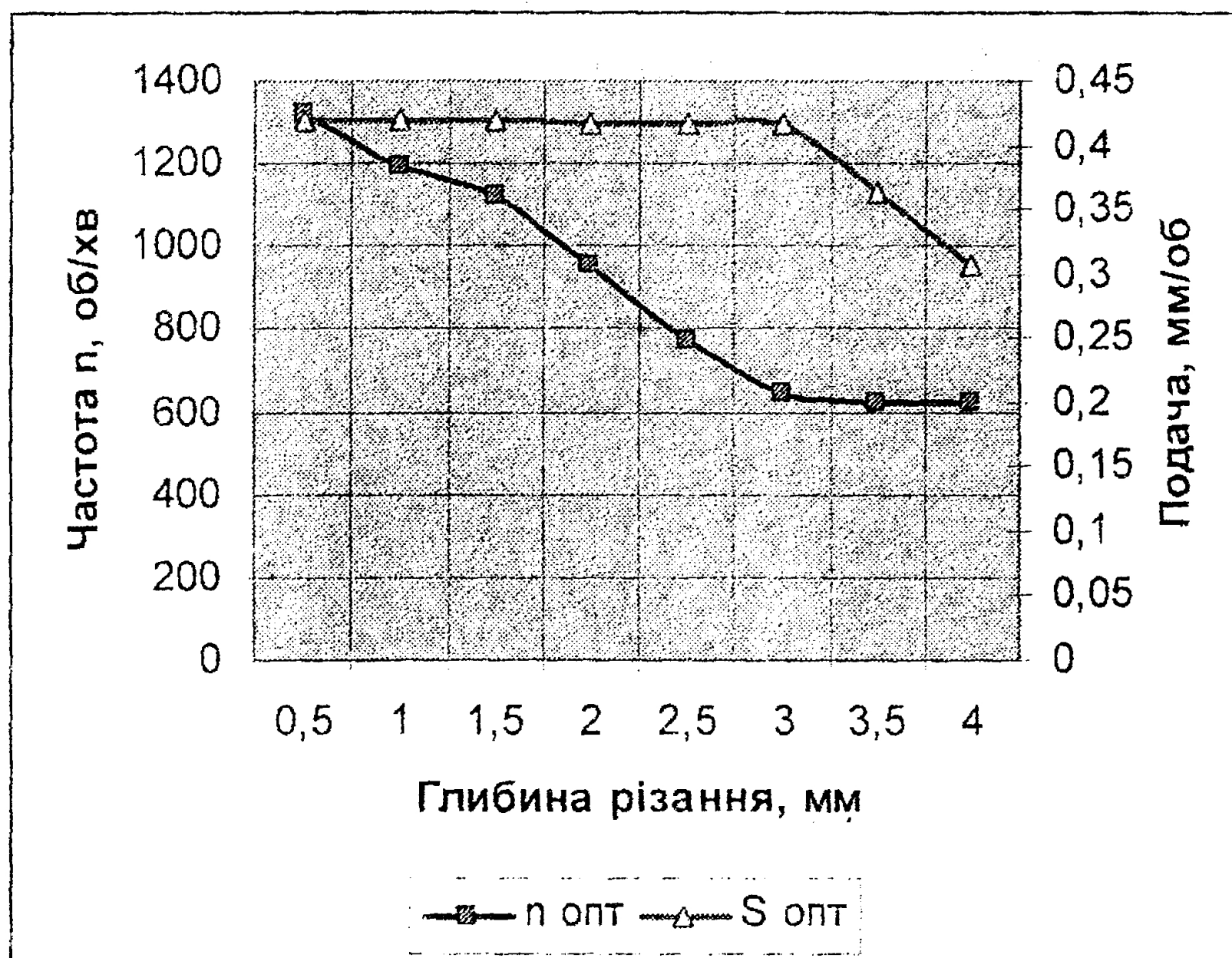


Рис.8.5. Експериментальні залежності оптимального режиму різання від глибини різання

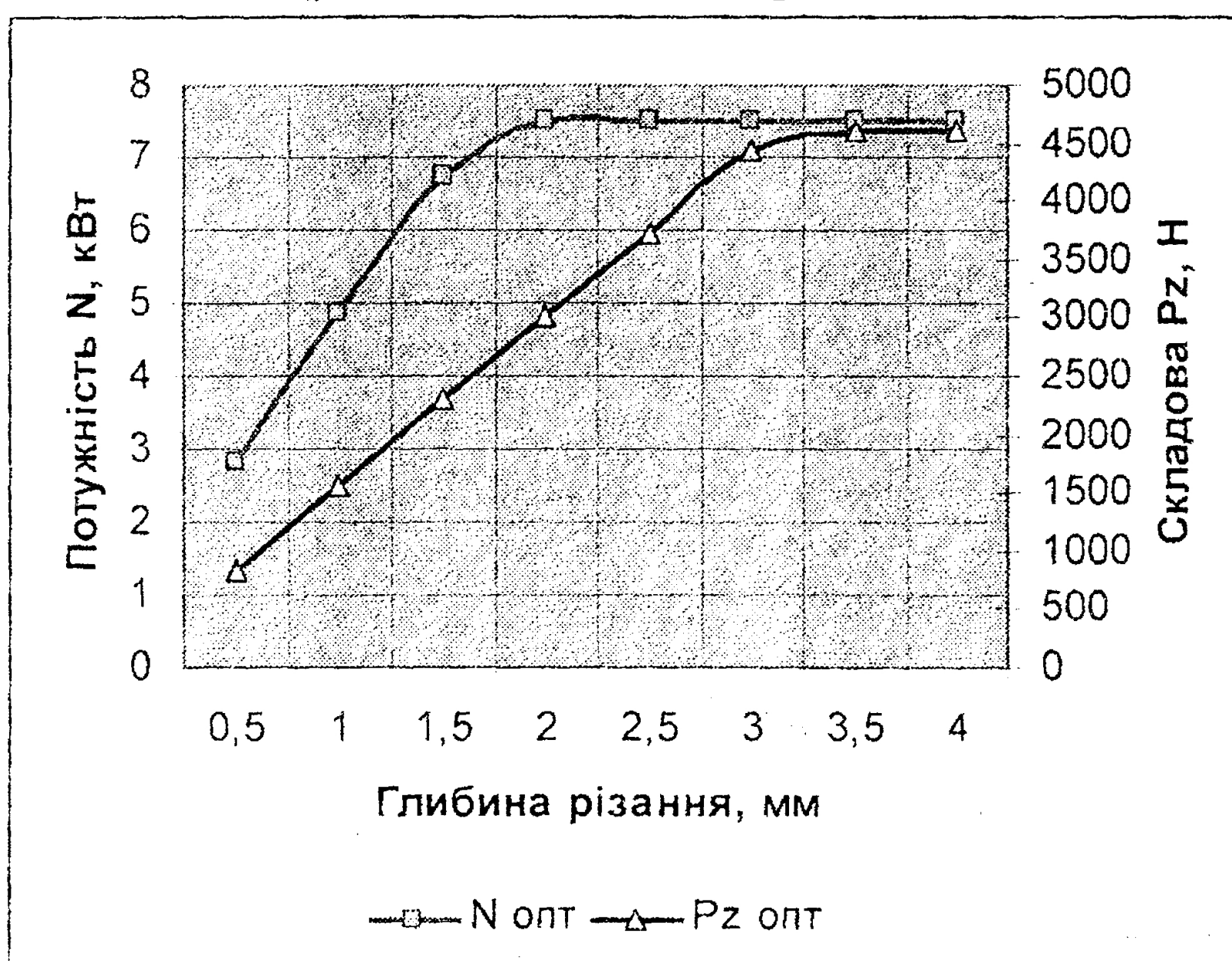


Рис.8.6. Експериментальні залежності потужності різання і складової Pz сили різання від глибини різання при оптимальному режимі

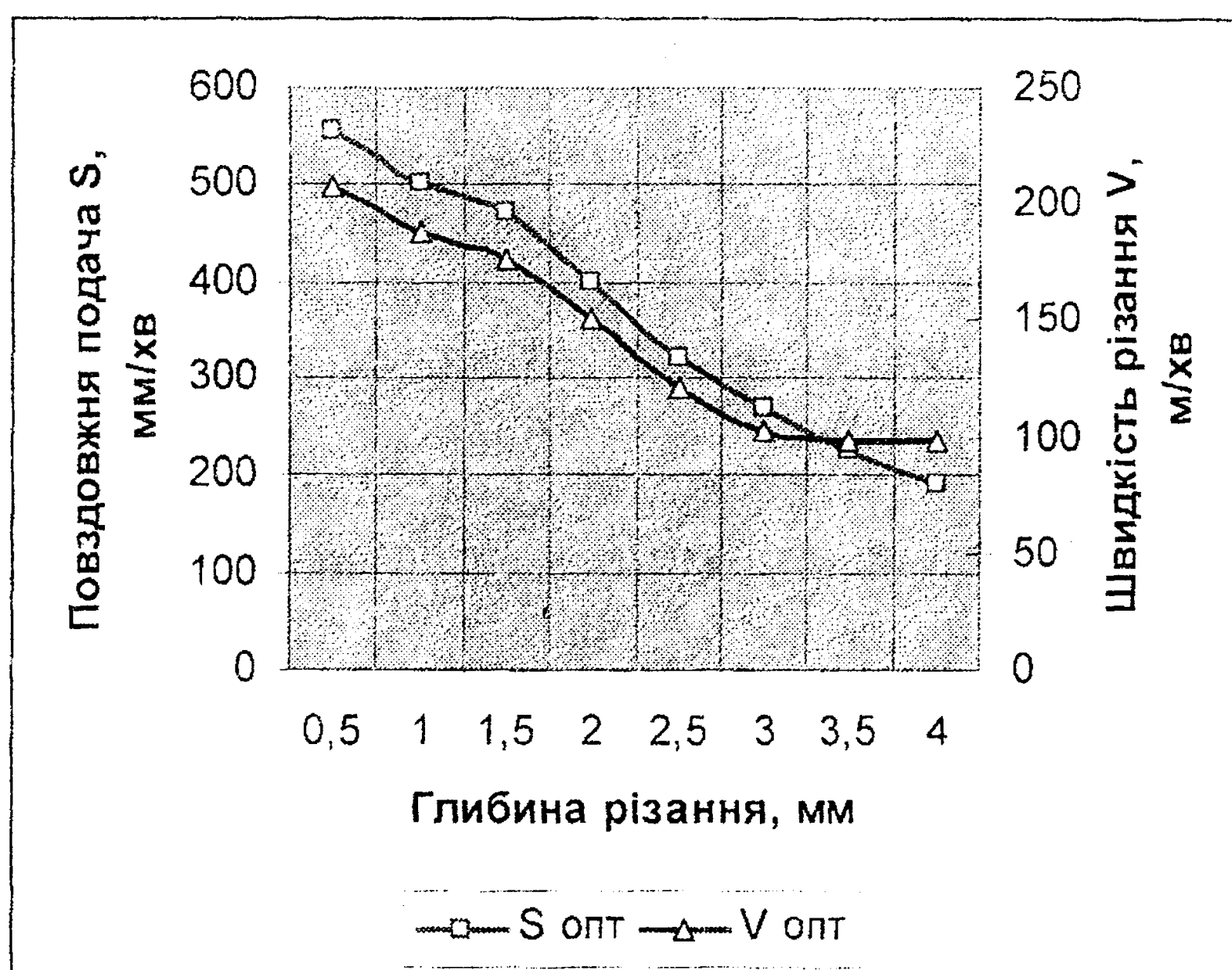


Рис. 8.7. Експериментальні залежності продуктивності і швидкості різання від глибини різання при оптимальному режимі

Аналіз отриманих експериментальних результатів (рис. 8.5) свідчить, що закон оптимального управління має дві зони:

- оптимальне оброблення до глибини різання 3 мм відбувається з постійною подачею на оберт заготовки, проте частота обертання знижується майже за лінійною залежністю,
- оптимальне оброблення з глибиною, що перевищує 3 мм виконується з постійною частотою обертання заготовки, проте повздовжня подача знижується також майже за лінійною залежністю.

При проведенні експериментів можна помітити, що оптимальна точка фазової площини n - S утворюється в основному трьома обмеженнями: за стійкістю, за потужністю і за шорсткістю. До глибини різання 3 мм основним обмеженням, що накладається на подачу, є обмеження за необхідною шорсткістю обробленої поверхні. При збільшенні глибини різання вступає в дію четверте обмеження – за силою подачі верстату (дивись також рис. 8.4, б).

Стосовно енергетичних характеристик оптимального процесу різання, можна зробити висновки з аналізу графіків за рис. 8.6. При глибині різання більше за 2 мм використовується вся можлива потужність верстату, тобто головним обмеженням є обмеження за потужністю. Для підвищення продуктивності з такими глибинами різання (чорнове оброблення) необхідно використовувати більш потужний верстат. Слід звернути увагу на те, що при глибині різання більше 3 мм максимальні значення потужності співпадають з максимальною силою різання. Та-

кий результат свідчить про певну оптимальність конструктивного рішення вибору параметрів верстату.

За аналізом результатів експериментальних досліджень, що представлені на рис.8.7, можна зробити наступні висновки:

- продуктивність верстату, яка оцінюється за часом оброблення поверхні деталі, тобто за величиною повздовжньої подачі, поступово знижується;
- продуктивність верстату, яка оцінюється зо об'ємом зрізаного припуску за хвилину ($h \cdot S_{xв}$) зі збільшенням глибини різання збільшується, а після 2мм залишається постійною – такий результат добре корелюється з графіком залежності потужності різання;
- оптимальна швидкість різання також знижується до глибини різання 3мм, а потім залишається постійною.

Для виконання експериментальних досліджень за останнім завданням необхідно підготувати таблицю експериментальних даних, визначивши діапазон і крок зміни головного кута у плані різця (табл. 8.2). Графіки експериментальних залежностей представлені на рис.8.8.

Таблиця 8.2. Залежність оптимального режиму різання від головного кута у плані різця

№	ϕ , град	S, мм/хв	V, м/хв	№	ϕ , град	S, мм/хв	V, м/хв
1	20	401	148	5	60	398	150
2	30	398	150	6	70	384	144
3	40	398	150	7	80	370	138
4	50	398	150				

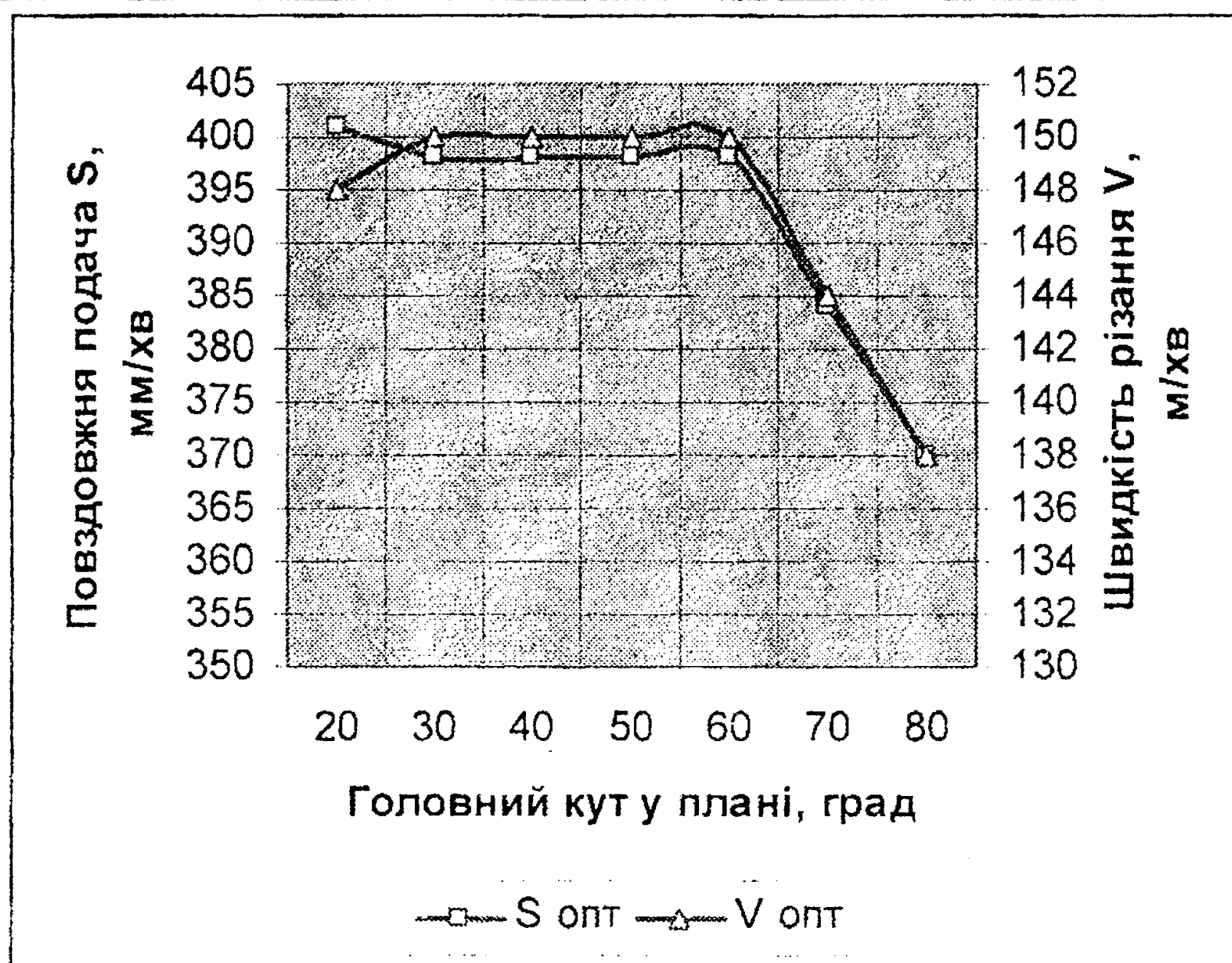


Рис.8.8. Графіки експериментальних залежностей S і V від кута ϕ

Аналіз отриманих в останньому експерименті результатів показує, що, не зважаючи на існуючу залежність стійкості інструменту від головного кута у плані, величина повздовжньої подачі і оптимальна швидкість різання до значення кута 60° майже не змінюються, а тільки потім зменшуються. Такий результат пояснюється тим, що при куті, меншим за 60° обмеження за стійкістю різця не утворює оптимальної вершини області можливих значень режиму різання.

Завдання

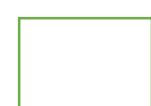
У відповідності до варіанту завдання за допомогою прикладної програми провести визначення оптимального режиму різання в залежності від глибини різання на заданому діапазоні зміни, а також від головного кута у плані різця. Результати занотувати у таблиці експериментальних даних і за ними побудувати відповідні графіки. Провести аналіз отриманих результатів.

Треба зауважити, що для виконання обґрунтованого аналізу отриманих результатів з подальшою можливістю надання рекомендацій щодо підвищення продуктивності, рекомендується при проведенні експериментів занотовувати обмеження, які утворюють вершину області D можливих значень при визначенні оптимального режиму різання.

Крім того, за результатами досліджень продуктивності від глибини різання необхідно зробити висновки щодо доцільності зрізання заданого припуску (при збільшенні глибини різання) за декілька робочих ходів. Такий аналіз зручно виконувати за результатами, що представлені на рис.8.7. Варіанти завдання представлені у таблиці 8.3.

Таблиця 8.3. Вихідні дані

Перша цифра	Параметри верстату						Матеріал	
	N, кВт	P_n , кН	n_{min} , об/хв	n_{max} , об/хв	S_{min} , мм/об	S_{max} , мм/об	заготовка	інструмент
0	10	2,5	12,5	1600	0,07	0,8	Сталь 30	T15K6
1	7	1,8	24	1800	0,10	0,7	Чавун КЧ60	BK8
2	5	1,6	48	2000	0,08	0,9	Сталь 45	T5K10
3	9	2,8	120	3600	0,11	1,1	Бронза БрМц5	P6M5
4	4	1,1	220	4200	0,09	1,0	Алюміній АК8	P6M5
5	8	2,1	36	1900	0,07	0,8	Чавун СЧ20	BK6
6	5	1,5	320	2400	0,05	0,6	Латунь ЛС59-1	P6M5
7	10	3,0	28	1200	0,12	1,6	Сталь 65Г	T15K6
8	6	2,6	196	2800	0,07	1,2	Алюміній Д6	P6M5K5
9	8	2,9	48	2100	0,08	1,4	Сталь 30ХГТ	T15K6



Продовження таблиці 8.2. Вихідні дані

Друга цифра	Процес різання			Різець		
	T, хв	Rz, мкм	D, мм	φ, град	φ ₁ , град	r, мм
0	60	20	60	45	40	0,40
1	50	10	40	50	45	0,35
2	40	5	30	55	30	0,20
3	30	10	90	60	25	0,25
4	120	20	50	65	25	0,15
5	80	5	70	75	20	0
6	90	10	30	80	20	0,05
7	70	20	100	45	50	0,30
8	100	5	80	40	60	0,50
9	20	10	20	55	35	0,10

Зміст протоколу

У протоколі навести вихідні дані (у відповідності до варіанту); копію інтерфейсу для будь-якого значення глибини різання з позначками, що визначають всі обмеження області допустимих значень; таблицю експериментальних даних; графіки відповідних залежностей. Аналіз і висновки.
