

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-164-170](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-164-170)

УДК 621.91

**Андрій Сергійович Василенко¹, Олена Олексіївна Мельник²,
Анатолій Анатолійович Субін³**

¹студент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
E-mail: 37robota2021@gmail.com

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
E-mail: melnyk.olena@lil.kpi.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8667-4262>, ResearcherID: [NGS-5051-2025](https://orcid.org/NGS-5051-2025)

³кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
E-mail: anatoliy.subin@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-2397>, ResearcherID: [AAC-5786-2022](https://orcid.org/AAC-5786-2022)

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ РЕЖИМІВ ОБРОБЛЕННЯ ОСЬОВИМ ЛЕЗОВИМ РІЗАЛЬНИМ ІНСТРУМЕНТОМ

У роботі розглянуто оптимізація режимів різання в умовах цифрової трансформації машинобудування. Особливу увагу приділено обробленню отворів осьовими лезовими інструментами з використанням ЧПУ. Запропоновано алгоритм автоматизованого розрахунку режимів, що враховує характеристики матеріалів, інструментів і вимоги до точності. Впровадження таких рішень сприяє підвищенню якості, ефективності та конкурентоспроможності виробництва.

Ключові слова: осьовий інструмент; послідовність оброблення; лезове оброблення; осьовий лезовий інструмент; свердло, режими різання при свердлінні.

Рис.: 2. Бібл.: 7.

Актуальність теми. Головним процесом у машинобудівному виробництві є процес оброблення різанням. Він усе ще залишається актуальним для дослідження, оскільки є досить універсальним і в сучасних умовах здатен до оброблення всіх конструкційних матеріалів. Нині важливу роль відіграє впровадження швидких методів прогнозування режимів різання в процесі оброблення. Левова частка при цьому спрямована саме на вдосконалення їх практичного застосування.

Стрімке зростання інформаційних технологій є характерною ознакою сьогодення в машинобудуванні. Це призводить до зміни в організації, управлінні та роботі машинобудівного виробництва. Поряд з активним використанням верстатів із числовим програмним управлінням (ЧПУ), широко використовуються автоматизовані системи проектування технологічних процесів з залученням технології штучного інтелекту. Додатково слід зазначити, що завдяки зростанню інформаційних технологій є можливість скорочення фінансових витрат загалом і витрат часу окремо у виробництві. Взагалі всі зазначені аспекти описано у стратегії CALS [1] і, відповідно, її реалізації в машинобудуванні.

Охоплення всіх аспектів створення єдиної інтегрованої моделі виробу є основною моделлю CALS технологій, тобто системний підхід, що ґрунтується на врахуванні всіх етапів життєвого циклу (ЖЦ) продукції – від її створення до утилізації. Інтеграція цих етапів забезпечується стандартизацією подання інформації або її результатів, у процесах проектування, матеріально-технічного забезпечення, виробництва, ремонту, обслуговування тощо. Такий підхід формує нову основу для інформаційної інтеграції та забезпечення спадковості використання даних.

Правильно підібрані режими різання зменшують витрати енергії, зношування інструментів і кількість браку. Це знижує собівартість виробництва, що особливо важливо в умовах високої конкуренції та зростання цін на матеріали й енергоносії.

Осьові лезові інструменти використовуються для створення отворів із високими вимогами до точності та шорсткості поверхні. Алгоритми визначення параметрів оброблення враховують характеристики матеріалу, геометрію інструменту та динаміку різання. В контексті цифрової трансформації та концепції CALS, ці алгоритми є основою для

автоматизації та інтеграції в системи ЧПУ та САПР. Сукупність подібних алгоритмів для всіх видів різальних інструментів на всіх етапах оброблення забезпечує створення єдиної інформаційної моделі, що полегшує проєктування, планування та контроль виробництва в цілому. Крім того, розробка алгоритмів дозволяє адаптувати режими різання до унікальних властивостей матеріалів, забезпечуючи їх ефективне оброблення.

Постановка проблеми. Ядром CALS-технологій є застосування CAD/CAM/CAE підсистем. Якщо CAD є достатньо стандартизованим і шаблонізованим, то впровадження і використання CAM/CAE потребують додаткових зусиль. Технологічна підготовка виробництва передбачає наступні етапи: науково дослідні розробки, конструкторські підготовки виробництва, технологічну підготовку виробництва та системи управління процесами оброблення.

Враховуючи велику вагу оброблення в собівартості виготовлення деталі, визначення оптимальних умов обробки є критичним для забезпечення максимальної продуктивності в рамках технологічної підготовки виробництва.

Метою статті є вибір методики й розробка алгоритму автоматизованого визначення режиму різання при свердлінні та розсвердлюванні для заданих умов оброблення із забезпеченням найбільшої продуктивності згідно з CALS.

Результати дослідження. Дослідження технологічних процесів у машинобудівному виробництві дозволили визначити їх розподіл за критерієм трудомісткості [2; 3; 4] відповідно рис. 1.



Рис. 1. Розподіл технологічних процесів на ринку

Як видно з рис. 1, свердління займає 36 % потреб в технологічних процесах. Найчастіше в роботі при типових послідовностях оброблення осьовими інструментами забезпечують оброблення отворів з точністю розмірів IT12-IT7 та параметрами шорсткості обробленої поверхні Ra20-Ra1,25. Типовим і доступним інструментом є гвинтові спіральні свердла зі швидкорізальних інструментальних сталей. На цей час на ринку спостерігається активне використання нових інструментальних матеріалів, зокрема металокерамічних твердих сплавів. При цьому свердла діаметром до 12 мм зберігають традиційну конструкцію і повністю виготовляються з твердого сплаву. Натомість свердла більших розмірів мають нову модульну конструкцію, де різальні кромки формуються за допомогою змінних багатограних пластин із різноманітними системами механічного кріплення.

Як правило, на виробництві для визначення режимів різання при обробленні осьовими інструментами, зазвичай застосовують два методи: аналітичний і табличний. Аналітичний метод передбачає розрахунок необхідних параметрів на основі математичних моделей, створених за результатами експериментальних досліджень. Табличний метод опирається на заздалегідь складені таблиці режимів різання, які враховують різні умови

технологічних процесів і містять дискретні значення, що допускають певну похибку залежно від конкретних умов. До впровадження обчислювальної техніки табличний метод мав явні переваги, оскільки пошук параметрів у друкованих таблицях займав менше часу, ніж виконання розрахунків за математичними моделями, які часто обмежувалися недостатньою кількістю вихідних даних для їх створення.

Широке впровадження інформаційних технологій кардинально змінило ситуацію. Наявність і використання персонального комп'ютера робітником, у сукупності із сучасним програмним середовищем і технологій штучного інтелекту дозволяють використовувати саме аналітичні методи при визначенні параметрів оброблення. Звісно математичні моделі що використовуються корелюються з попередньо визначеними табличними значеннями для типових параметрів оброблення, але головним чинником є сама модель оброблення і алгоритм визначення.

Існуючі алгоритми розрахунку режимів різання для осьового інструменту [2-4] використовують довідкові таблиці для визначення параметрів різання. Кожен з виробників інструментів або верстатів використовує власні таблиці для своєї номенклатури виробів. Тобто, використовують загальні рекомендації, для сталі HSS-свердлом (High Speed Steel - швидкорізальна сталь): $V_c = 15\text{--}30$ м/хв, для твердосплавного свердла: $V_c = 50\text{--}100$ м/хв, а якщо з мастильно-охолоджувальною рідиною (МОР), то швидкість можна збільшити на 10–30 % (наприклад, для сталі з МОР: $V_c = 20\text{--}40$ м/хв для HSS. Також проаналізувавши [2-4], можливо виділити основні ключові рекомендації фірм і для коригування швидкості різання, зменшить V_c на 10–20 % для твердих матеріалів (наприклад, нержавіюча сталь). Для глибокого свердління ($L/D > 5$) зменшить V_c на 20–30 % для стабільності процесу. Якщо використовується MQL (Minimum quantity lubrication) або кріогенне охолодження, V_c можна збільшити на 20–50 %.

Тому аналіз процесу оброблення дозволив розробити узагальнений алгоритм (рис. 2) розрахунку режимів оброблення осьовим лезовим різальним інструментом, що передбачає послідовне вирішення типових технологічних завдань, а саме:

- аналіз геометричних характеристик отвору, що оброблюється передбачає визначення його розміру, виду отвору-наскрізний або глухий; характеру оброблення отвору - в суцільному матеріалі або попередньо виготовленого в конструкції заготовки;
- аналіз фізико-механічних характеристик оброблюваного матеріалу та їх можливий розбіг у партії заготовок, способу виготовлення заготовки, що є основою для обґрунтованого вибору групи та підгрупи інструментального матеріалу;
- аналіз характеристик якості оброблення отвору, які встановлено кресленням деталі, визначає технологічну послідовність його оброблення;
- обґрунтування вибору виду і моделі металорізального верстата для виконання процесу оброблення та аналіз технологічних можливостей верстата, а саме: діапазону частоти обертання шпинделя, діапазону подач, допустимої сили механізму подач, допустимого моменту на шпинделі верстата та потужності двигуна головного приводу верстата.

Зазначені технологічні параметри вказані в технічному паспорті кожного металорізального верстата. Зазвичай на діючому виробництві вибір верстата обмежується специфічними умовами, що визначають тип обладнання та його розташування на виробничій ділянці. Тобто є певна обмеженість можливостей, в межах ділянки чи цеху.

При розробці програмного забезпечення було використано такі математичні залежності [5-7].

Відповідно, глибина різання при свердлінні визначається за формулою:

$$h_c = \frac{D_c}{2}, \quad (1)$$

а для розсвердлювання:

$$h_{pc} = \frac{D_{pc} - D_c}{2}, \quad (2)$$

де D_{pc} – діаметр свердла для розсвердлювання; D_c – діаметр свердла для свердління.

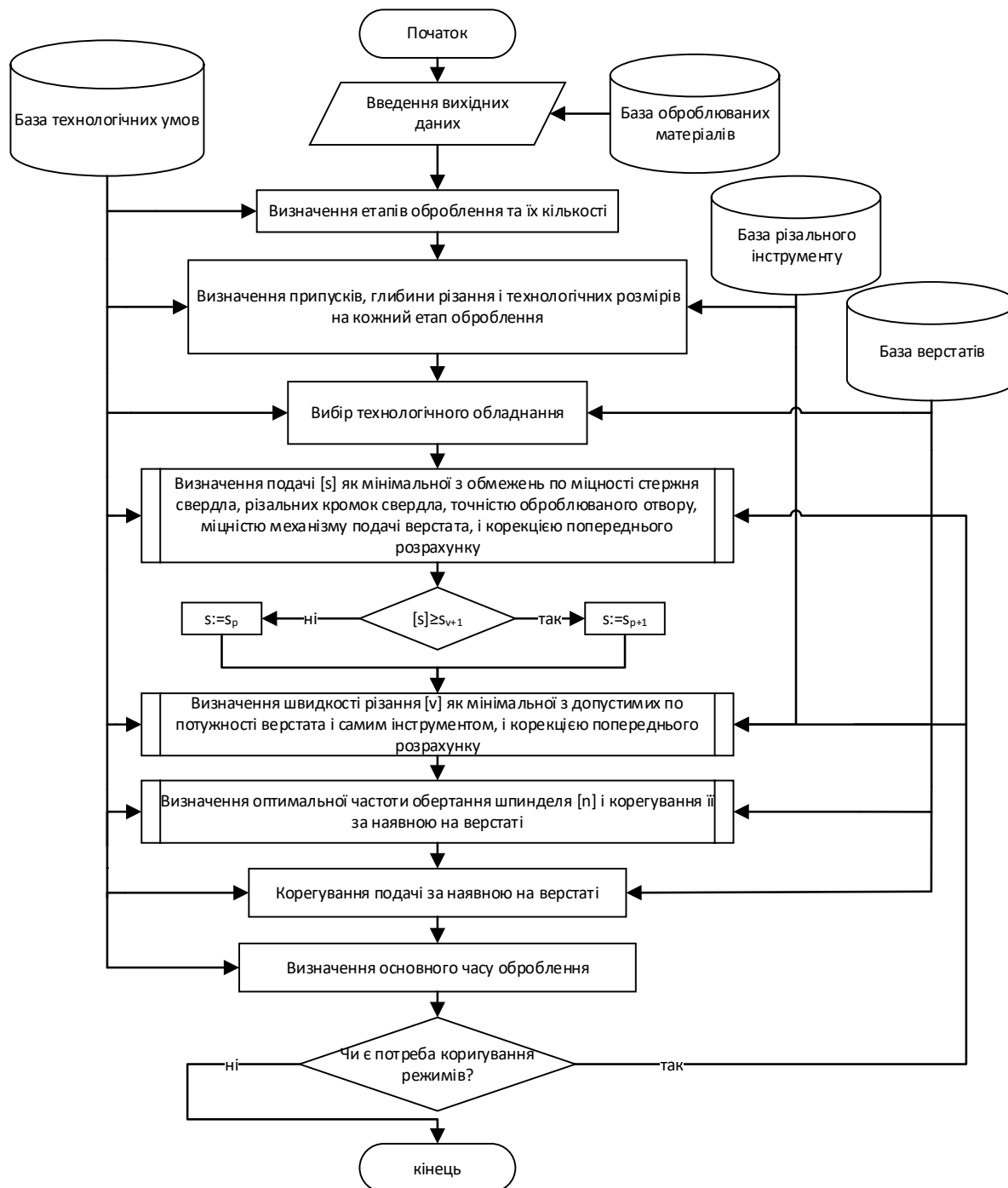


Рис. 2. Алгоритм роботи створеного програмного забезпечення

Алгоритм розрахунку режимів різання при свердлінні передбачає визначення таких подач:

$[S]_{MC}$ – подача, яка допускається міцністю стержня свердла, $[S]_{PK}$ – подача, яка допускається міцністю різальних кромок, $[S]_{TO}$ – подача, яка допускається точністю оброблення, $[S]_{MP}$ – подача, яка допускається міцністю механізму подач.

Подача, яка допускається міцністю стержня свердла $[S]_{MC}$ визначається за формулою:

$$[S]_{MC} = \left[\frac{2 \cdot \sigma_{3T} \cdot D^{3-Z_M}}{10^6 \cdot \sqrt{3} \cdot n_3 \cdot C_M \cdot h^{x_M} \cdot K_M} \right]^{1/Y_M}, \quad (3)$$

де $[S]_{MC}$ - подача, яка допустима міцністю стержня свердла, мм/об; σ_{3T} – границя міцності при згині матеріалу свердла, МПа, якщо свердло виготовлене з швидкорізальної сталі або суцільне твердосплавне. Якщо використовується свердло з твердосплавними напайками, σ_B – границя міцності на розрив матеріалу стержню свердла (найчастіше це леговані конструкційні сталі 45X або 40XMФА термооброблені), n_3 – коефіцієнт запасу, який забезпечує безпечну роботу свердла при нормальному зносі. У розрахунках приймають $n_3 = 2,5$ для оброблення сталі та $n_3 = 4$ для оброблення чавунів. C_M , K_M , Z_M , Y_M - коефіцієнти та показники ступеня у формулі.

Подача, яка допускається міцністю різальних кромок $[S]_{PK}$ визначається за формулою:

$$[S]_{PK} = C_S \cdot D \cdot 0,6, \quad (4)$$

де C_S - коефіцієнт пропорційності.

Визначення подачі за міцністю механізму подач $[S]_{MP}$ визначається за формулою:

$$[S]_{MP} = \left[\frac{[P_0]_{MP}}{10 C_P \times D^{Z_P} \times h^{x_P} \times K_P} \right]^{1/Y_P}, \quad (5)$$

де $[P_0]_{MP}$ - найбільша осьова сила, допустима верстатом, Н; C_P , K_P , Z_P , Y_P - коефіцієнт пропорційності, поправочний коефіцієнт та показники ступеня у формулі осьової сили різання.

Як розрахункову приймають найменшу з перелічених величин з урахуванням можливої корекції за результатами попереднього розрахунку $[S]_{i-1}$:

$$[S] = \min \{ [S]_{MC}; [S]_{PK}; [S]_{TO}; [S]_{MP}; [S]_{i-1} \}. \quad (6)$$

Далі необхідно розрахувати швидкість різання, яка допускається різальними властивостями свердла $[V]_i$ та швидкості різання, яка допускається потужністю двигуна головного приводу верстата $[V]_B$.

Визначити швидкості за різальними властивостями інструменту $[V]_i$ визначається за формулою:

$$[V]_i = V = \frac{C_V \cdot K_V \cdot D^{Z_V}}{(60 \cdot T^m \cdot h^{x_V} \cdot S^{y_V})}, \quad (7)$$

де T – період стійкості інструмента; C_V – коефіцієнт; Z_V , x_V , y_V , m - показники ступеня; K_V – поправочний коефіцієнт, що враховує відмінність умов різання від табличних.

Визначення швидкості різання за потужністю двигуна головного приводу верстата $[V]_B$ визначається за формулою:

$$[V]_B = \frac{N_{дв} \cdot \eta}{20 \cdot C_M \cdot D^{Z_M-1} \cdot S^{y_M} \cdot h^{x_M} \cdot K_M}, \quad (8)$$

де $N_{дв}$ - потужність електродвигуна, кВт; η - коефіцієнт корисної дії ланки головного руху різання ($\eta = 0,8 \dots 0,9$ або $\eta \approx 0,85$).

Як розрахункову швидкість різання визначають як найменшу з перелічених величин з урахуванням можливої корекції за результатами попереднього розрахунку $[V]_{i-1}$:

$$[V] = \min \{ [V]_i; [V]_B; [V]_{i-1} \}. \quad (9)$$

Визначення оптимальної частоти обертання шпинделя визначається за формулою:

$$[n] = \frac{60 \times 1000 \times [V]_{min}}{\pi \times D} \quad (10)$$

Для оцінювання продуктивності процесу оброблення за розрахованими режимами визначають основний час оброблення:

$$T_o = \frac{l_{xi} \times i}{n \times S_o} \rightarrow \min, \quad (11)$$

де l_{xi} – довжина ходу інструмента; n – частота обертання шпинделя; S_o – поздовжня подача; i – число робочих ходів.

Враховуючи (1.10) та $i = \frac{z_{omax}}{h}$, отримаємо формулу:

$$T_o = \frac{l_i \cdot z_{omax}}{1000 \cdot n \cdot V \cdot S \cdot \frac{C_{To}}{h \cdot S \cdot V}}, \quad (12)$$

$$\text{де } C_{To} = \frac{l_i \cdot z_{omax}}{1000}. \quad (13)$$

Отримаємо таку залежність для критерію оптимізації:

$$\begin{aligned} T_o &\rightarrow \min, \\ h &\rightarrow \max; S_o \rightarrow \max; V \rightarrow \max. \end{aligned} \quad (14)$$

Наприкінці алгоритму надається можливість корегування режимів для забезпечення кращої відповідності критеріям оптимізації. Скореговані значення є обмежувачами в варіантах визначення подачі (6) і швидкості різання (9).

Таким чином розроблений алгоритм дозволяє вирішити задачу визначення оптимальних умов чорнкової обробки осьовим лезовим різальним інструментом. Послідовність дій в алгоритмі і чітка визначеність параметрів що розраховуються дозволяють достатньо легко реалізувати запропонований алгоритм у вигляді прикладної програми або програмного модуля. Реалізація алгоритму дозволить проєктувати операції обробки за критеріями максимізації продуктивності.

Висновок. Розроблений алгоритм розрахунку режимів різання для свердління та розсвердлювання дозволяє проєктувати технологічні операції для досягнення максимальної продуктивності. Запропонована формалізація розрахунків режимів різання для обробки осьовими інструментами необхідна для їх подальшої інтеграції в CAD/CAM/CAE-системи. Окрім ефекту для осьової обробки це також сприяє підвищенню ефективності технологічної підготовки виробництва.

Список використаних джерел

1. Замірець, М. В., Ілюшко, В. М., Мелешенко, С. Ю., Максимова, К. Л., Плотнікова, З. В., & Рикова, В. В. (2005). *CALS-технології в забезпеченні життєвого циклу електронних засобів: Частина 1*. Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут».
2. Sandvik Coromant. (n.d.). Drilling. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/drilling>.
3. Sandvik Coromant. (n.d.). CoroDrill DE10 brochure. [https://www.sandvik.coromant.com/api/publications/view?url=https://cdn2.sandvik.coromant.com/publications/c-1040-366corodrillde10brochure-pdf_en-us__a620ed58-4893-4856-b3e2-0e5e3cbf06db.pdf&fileName=C-1040-366%20CoroDrill%20DE10%20brochure-pdf_\(en-us\).pdf](https://www.sandvik.coromant.com/api/publications/view?url=https://cdn2.sandvik.coromant.com/publications/c-1040-366corodrillde10brochure-pdf_en-us__a620ed58-4893-4856-b3e2-0e5e3cbf06db.pdf&fileName=C-1040-366%20CoroDrill%20DE10%20brochure-pdf_(en-us).pdf).
4. Shaw, M. C. (2005). *Metal cutting principles* (2nd ed.). Oxford University Press.
5. Паливода, Ю. Є., Дячун, А. Є., & Лещук, Р. Я. (2019). *Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки*. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.
6. Мазур, М. П., Внуков, Ю. М., Доброскок, В. Л., Залога, В. О., Новосьолов, Ю. К., & Якубов, Ф. Я. (2011). *Основи теорії різання матеріалів* (2-ге вид., перероб. і доп.). Новий Світ–2000.
7. Глоба, О. В., Вовк, В. В., Красновид, Д. А., & Солодкий, В. І. (2022). *Теорія різання: Підручник для студентів спеціальності 131 – Прикладна механіка*. КПІ ім. Ігоря Сікорського.

References

1. Zamirets, M. V., Ilyushko, V. M., Meleshenko, S. Yu., Maksymova, K. L., Plotnikova, Z. V., & Rykova, V. V. (2005). CALS-tekhnologii v zabezpechenni zhyttievoho tsykladu elektronnykh zasobiv: Chastyna 1 [CALS technologies in the life cycle support of electronic devices: Part 1]. *Natsionalnyi aerokosmichnyi universytet «Kharkivskiy aviatsiyniy instytut» - Kharkiv: National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"*.
2. Sandvik Coromant. (n.d.). Drilling. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/drilling>.
3. Sandvik Coromant. (n.d.). CoroDrill DE10 brochure. [https://www.sandvik.coromant.com/api/publications/view?url=https://cdn2.sandvik.coromant.com/publications/c-1040-366corodrillde10brochure-pdf_en-us_a620ed58-4893-4856-b3e2-0e5e3cbf06db.pdf&fileName=C-1040-366%20CoroDrill%20DE10%20brochure-pdf_\(en-us\).pdf](https://www.sandvik.coromant.com/api/publications/view?url=https://cdn2.sandvik.coromant.com/publications/c-1040-366corodrillde10brochure-pdf_en-us_a620ed58-4893-4856-b3e2-0e5e3cbf06db.pdf&fileName=C-1040-366%20CoroDrill%20DE10%20brochure-pdf_(en-us).pdf).
4. Shaw, M. C. (2005). *Metal cutting principles* (2nd ed.). Oxford University Press.
5. Palyvoda, Yu. Ye., Dyachun, A. Ye., & Leshchuk, R. Ya. (2019). *Instrumentalni materialy, rezhymy rizannia, tekhnichne normuvannia mekhanichnoi obrobky* [Tool materials, cutting modes, and technical standardization of machining]. Ternopilskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet imeni Ivana Puliuia – Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University.
6. Mazur, M. P. (Ed.), Vnukov, Yu. M., Dobroskok, V. L., Zaloga, V. O., Novosyolov, Yu. K., & Yakubov, F. Ya. (2011). *Osnovy teorii rizannia materialiv* [Fundamentals of cutting theory] (2nd ed., revised and expanded). Novyi Svit–2000.
7. Hloba, O. V., Vovk, V. V., Krasnovyd, D. A., & Solodkyi, V. I. (2022). *Teoriia rizannia: Pidruchnyk dlia studentiv spetsialnosti 131 – Prykladna mekhanika*. [Cutting theory: Textbook for students of specialty 131 – Applied Mechanics]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

Отримано 19.06.2025

UDC 621.91

Andriy Vasylenko¹, Olena Melnyk², Anatoly Subin³

¹student of the Department of Mechanical Engineering Technology
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: 37robota2021@gmail.com

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: melnyk.olena@iit.kpi.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8667-4262>, **ResearcherID:** [NGS-5051-2025](https://orcid.org/NGS-5051-2025)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: anatoliy.subin@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5747-2397>, **ResearcherID:** [AAC-5786-2022](https://orcid.org/AAC-5786-2022)

ALGORITHM FOR CALCULATING CONDITIONS FOR AXIAL CUTTING TOOLS

In modern mechanical engineering production, machining by cutting remains a key technological process due to its versatility and ability to process a wide range of materials. In the context of rapid advancements in information technologies, particularly the adoption of computer numerical control (CNC) machines and artificial intelligence systems, the optimization of cutting conditions has gained significant importance. This contributes to increased productivity, reduced financial and time costs, and ensures high processing quality. A crucial aspect is the integration of these technologies within the framework of CALS (Continuous Acquisition and Life-cycle Support), which involves creating a unified information model of a product across all stages of its life cycle—from design to disposal. CALS technologies enable data standardization, facilitating efficient information integration and data continuity in the processes of design, production, logistics, repair, and after-sales service.

Research aimed at improving methods for predicting and optimizing cutting conditions is critical for enhancing the efficiency of mechanical engineering production in the context of digital transformation. Particular attention is given to the machining of holes using axial cutting tools, where the accuracy of selecting cutting conditions directly impacts the quality and cost-effectiveness of the process. The study presents a generalized algorithm for the operation of software developed for the automated calculation of optimal cutting conditions. This algorithm takes into account technological parameters, material and tool characteristics, as well as requirements for accuracy and productivity. The implementation of such solutions enhances the competitiveness of production, reduces costs, and supports the sustainable development of the industry.

Keywords: axial tool; machining sequence; blade machining; axial blade tool; drill; cutting modes during drilling.

Fig.: 2. References: 7.