

УДК 621.91.02

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344648

ЛІНІЙНА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗГОРТАННЯ ОТВОРУ
ВТУЛКИ ЗУБЧАСТОГО РЕДУКТОРА

Попов С.В.

канд. техн. наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2381-152X>, e-mail: stanislav.popov@pdau.edu.ua

Розглядається задача оптимізації режимів різання під час розгортання отворів у втулках зубчастих редукторів. Відмічено, що точність та якість обробки суттєво залежать від правильно визначених параметрів швидкості різання та подачі. Вони впливають на продуктивність та стійкість різального інструменту. Запропоновано математичну модель процесу розгортання з урахуванням технічних обмежень металорізального верстату та інструменту. Сформульовано критерій оптимальності, запропоновано систему нерівностей. Використання методу лінійної оптимізації дозволило визначити оптимальні режими, що забезпечують максимальну продуктивність зі збереженням необхідної якості обробки.

Ключові слова: різальний інструмент, розгортання, втулка, допуск, припуск, частота обертання, подача, глибина різання, шорсткість поверхні, якість обробки.

Постановка проблеми

В конструкціях зубчастих редукторів деталі типу «втулка» мають важливе значення. Саме вони забезпечують надійну посадку валів, підшипників, а також зубчастих коліс. Окрім того, дозволяють компенсувати знос та спрощують ремонтні операції. Застосування втулок підвищує ремонтпридатність та довговічність редуктора. Під час пошкодження внутрішньої поверхні втулку можливо замінити без виготовлення нового корпусу або валу.

Якість внутрішніх отворів втулок має першочергове значення. Від їх точності залежить надійність з'єднання із валом, відсутність люфтів, а також зносо-стійкість вузла.

Обробка внутрішніх поверхонь втулок зазвичай виконується за декілька етапів. На першому етапі отвір отримується свердлінням. Формується необхідний діаметр із визначеним припуском. Потім виконується zenkerування. Воно уточнює форму отвору та зменшує шорсткість поверхні. При цьому залишається незначний припуск під наступний етап обробки. Фінальною операцією є розгортання. Воно забезпечує високу точність розмірів, чистоту поверхні.

Саме розгортання надає можливість отримати отвори високого квалітету. Це особливо важливо для посадок під підшипники або вали із мінімальними значеннями допусків.

Основною проблемою під час виготовлення втулок для зубчастих редукторів є пошук оптимальних режимів обробки розгортанням. Правильна швидкість різання, подача, глибина суттєво впливають на точність отвору, шорсткість, а також стійкість різального інструменту.

Хибне поєднання цих параметрів може призвести до передчасного зносу інструменту, зниження продуктивності, погіршенню якості посадки [1, 2]. Тому визначення оптимальних режимів розгортання стає особливо актуальним у сучасному машинобудуванні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розгортання посідає особливе місце серед операцій обробки отворів, тому що виконується на заключному етапі. Воно забезпечує остаточні розміри із високим квалітетом та мінімальною шорсткістю. При цьому вибір режимів різання має вирішальне значення на кінцевий результат. Завищене значення швидкості може викликати вібрації, припалювання на поверхні, прискорений знос. Завищена подача – збільшення шорсткості та зменшення точності. Неправильна глибина різання – поява задирок та брак деталі. Враховуючи те, що на процес розгортання впливають не тільки режимні параметри, але й матеріал заготовки, конструкція різального інструменту, застосування змащувально-охолоджувальної рідини, жорсткість технологічної системи, задачу пошуку оптимальних режимів різання намагається вирішити чимало кількості дослідників. Оптимізації процесів механічної обробки присвячено чимало праць і вітчизняних, і закордонних дослідників. Кожна із них має певну специфіку.

Зокрема автори [3] розглянули вплив конструктивних особливостей інструмента та режимів різання на його стійкість та продуктивність. Доведено ефективність використання пристроїв зі змінним вильотом інструмента та механізмів вібраційного свердління. Застосування таких рішень дозволяє, на їх думку, підвищити якість обробки та зняти обмеження, пов'язані із жорсткістю та міцністю інструмента.

У статті [4] проведено оптимізацію режимів різання на важких верстатах. Враховано конструктивні обмеження обладнання та інструмента. Пропонуються критерії оптимальності на основі приведених витрат, собівартості, продуктивності технологічного процесу. Визначено, що середній фактичний період стійкості має випадковий характер, підпорядковується закону Вейбулла. Застосування оптимальних режимів різання підвищує ефективність металообробки та забезпечує стабільність технологічного процесу.

Способи підвищення ефективності процесів механічної обробки за умов гнучкого автоматизованого виробництва розглянуто в статті [5]. Пропонується

інтегральний критерій для оцінювання ефективності технологічних систем – «інтенсивність формоутворення». Проведено аналіз ефективності застосування комбінованих осевих інструментів, а також багаторізових державок. Наведено результати експериментальних досліджень. Використання багаторізових накладок дозволяє підвищити продуктивність, зменшити трудомісткість. Підтверджено доцільність концентрації технологічних переходів як ефективного напрямку інтенсифікації виробничих процесів.

Задача оптимізації процесів виготовлення отворів із використанням методу пошуку заборон вирішена в [6]. Акцентується увага на зменшенні ручного маркування, простою обладнання, а також додаткових витрат часу. Запропонований алгоритм дозволяє одночасно враховувати послідовність та швидкість обробки для мінімізації загальних виробничих витрат. Отримані результати підтвердили ефективність підходу.

В роботі [7] досліджується вплив технологічних параметрів на якість отворів після розгортання. Проаналізовано вплив швидкості різання, подачі та ексцентриситету інструмента на циліндричність, шорсткість, діаметр отвору. Метод планування експерименту дозволив виявити вагомі фактори. Основний вплив має подача та швидкість різання.

Математична модель обробки отворів та типова структура автоматизованого проектування технологічних операцій подана авторами [8]. Розглянуто підхід до оптимального керування. Подача інструменту виступає як керуючий параметр, а сила різання – змінна, що контролюється. Розроблено алгоритми визначення параметрів-регуляторів, побудовано блок-схему автоматизованого процесу. Отримані результати впливають на підвищення ефективності, точності та надійності обробки.

У статті [9] розглянуто проблему оптимізації послідовного виконання операцій обробки отворів з урахуванням часу холостого ходу інструменту та часу переналагодження. Запропоновано математичну модель на основі динамічного програмування. Вона дозволяє визначити оптимальні рішення. Проведено порівняння із іншими методами та алгоритмами. Результати рекомендовані для підвищення продуктивності мехобробки та планування виробництва.

Отже, проведений аналіз засвідчив актуальність задачі оптимізації процесів обробки отворів, зокрема під час розгортання, де якість та точність суттєво залежать від режимів різання. Пошук оптимальних параметрів подачі та швидкості є необхідною умовою, яка забезпечить стабільність технологічного процесу, підвищення рівня продуктивності, зниження витрат.

Мета статті

Метою статті є аналіз впливу параметрів режиму розгортання отвору в деталі типу «втулка», що застосовується в конструкціях редукторів, а також визначення оптимальних значень частоти обертання

(швидкості), подачі, що забезпечать отримання отвору необхідної якості за умов раціонального використання різального інструменту.

Для цього необхідно виконати наступні завдання:

- 1) розробити математичну модель процесу розгортання з урахуванням основних технічних обмежень;
- 2) визначити критерій оптимальності;
- 3) сформулювати систему обмежень у вигляді нерівностей, що описують реальні технічні умови роботи металорізального верстату та інструменту;
- 4) провести визначення режимів різання, застосувавши метод лінійної оптимізації, які забезпечать максимальне значення продуктивності обробки за належного рівня якості.

Виклад основного матеріалу

На побудові математичних моделей заснована оптимізація технологічних процесів, а також режимів різання. Для того, щоб встановити математичну модель, необхідно виділити технічні обмеження. Саме вони значною мірою визначатимуть описуваний процес разом із критерієм оптимальності (функція оцінки). Призначення технічних обмежень залежить від конкретної обробки, а також визначається певними умовами технологічного, конструкційного, а також організаційно-виробничого характеру. Незважаючи на це, існує можливість виокремити ряд найважливіших технічних обмежень, що складуть основу математичної моделі процесу різання. Такими обмеженнями можуть бути: різальні властивості інструменту, визначені стійкістю; потужність електричного двигуна приводу головного руху; частота обертання шпинделя, подача, що зазначені у паспорті на верстат; жорсткість та міцність різального інструменту; точність процесу обробки; шорсткість поверхні після обробки.

Оціночною функцією приймемо мінімальну собівартість. Оптимізацію здійснюватимемо за двома параметрами, а саме, частотою обертання n , об/хв, та подачею S , мм/об. Технічні обмеження будуються за відомими залежностями. Вони приводяться до лінійного вигляду. Подаються у вигляді системи нерівностей. Саме у поєднанні з функцією оцінки нададуть математичну модель різання металу. Вивчення ж оптимальних режимів обробки, якими є частота обертання та подача, за математичною моделлю може бути реалізовано як аналітично, так і графічно. На підставі написаного вище визначимо оптимальні режими різання під час розгортання отвору $\varnothing 14H9^{(+0,043)}$ мм втулки зі сталі 45, що входить до складу циліндричного редуктора. Різальним інструментом є розгортка кінцева зі швидкорізальної сталі P6M5.

Перше обмеження, що враховує різальні можливості розгортки. З одного боку воно встановлює взаємозв'язок між лінійною швидкістю, що залежить від періоду стійкості інструменту, геометричними параметрами, глибиною різання, величиною подачі, механічними властивостями матеріалу, що зазнає обробки, та

з іншого – швидкістю різання, що визначається кінематикою верстата.

Як відомо, швидкість різання, V , м/хв, а також складові її рівняння визначаються відповідно до [10]:

$$V = \frac{C_V \cdot D^q}{T^m \cdot X \cdot S^Y} \cdot K_V, \quad (1)$$

де C_V , X , Y , q – коефіцієнти властивостей оброблюваного матеріалу, матеріалу різального інструменту, а також інші фактори, 10,5; 0,2; 0,65; 0,3;

D – діаметр інструменту, мм, 14;

T – період стійкості інструмента, хв, 40;

m – показник відносної стійкості. Він залежить від матеріалу як деталі, так і інструменту, товщини зрізаного шару, виду, умов обробки, 0,4;

t – глибина різання, мм, 0,1;

S – подача, мм/об;

K_V – коефіцієнт поправки:

$$K_V = K_{mV} \cdot K_{IV} \cdot K_{IV}, \quad (2)$$

де K_{mV} – коефіцієнт якості обробленого матеріалу, впливу його фізико-механічних властивостей на швидкість різання, 1,52;

K_{IV} – коефіцієнт властивостей матеріалу інструменту, 1;

K_{IV} – коефіцієнт глибини обробки, 1.

З іншого боку, значення швидкості може бути визначено із урахуванням кінематики металорізального верстату моделі MAST Metalltechnik M-KBM 50:

$$V = (\pi \cdot D \cdot n) / 1000, \quad (3)$$

де D – діаметр обробки, мм;

n – частота обертання шпинделя, об/хв.

Прирівняємо праві частини виразів (1) та (3). Виконавши перетворення отримаємо нерівність першого технічного обмеження:

$$n \cdot S^{0,65} \leq \frac{10,5 \cdot 14^{0,3} \cdot 1,52}{40^{0,4} \cdot 0,1^{0,2} \cdot \pi \cdot 0,014}. \quad (4)$$

Для вибору оптимальних значень режимів різання, застосовуючи метод лінійної оптимізації, усі технічні обмеження, а також функція оцінки приводяться до лінійного вигляду логарифмуванням, тобто маємо:

$$\ln n + 0,65 \ln S \leq \ln \frac{10,5 \cdot 14^{0,3} \cdot 1,52}{40^{0,4} \cdot 0,1^{0,2} \cdot \pi \cdot 0,014}. \quad (5)$$

Прийmemo позначення: $x_1 = \ln n$; $x_2 = \ln S$, а $b_1 = \ln \frac{10,5 \cdot 14^{0,3} \cdot 1,52}{40^{0,4} \cdot 0,1^{0,2} \cdot \pi \cdot 0,014}$.

Отримуємо перше технічне обмеження:

$$x_1 + 0,65x_2 \leq b_1; \quad (6)$$

$$b_1 = 5,67.$$

Друге обмеження, що враховує потужність електричного двигуна приводу головного руху верстату. Тут встановлюється взаємозв'язок ефективної потужності, що витрачається на процес розгортання із потужністю електричного приводу головного руху металорізального верстату.

Ефективне значення потужності різання, N_e , кВт, при розгортанні визначається відповідно до [10]:

$$N_e = \frac{M_{кр} \cdot n}{9750}, \quad (7)$$

де $M_{кр}$ – крутний момент, якщо розглядати кожен зубець як розточувальний різець, Н·м:

$$M_{кр} = \frac{C_p \cdot t^X \cdot \left(\frac{S}{Z}\right)^Y \cdot D}{2 \cdot 100}, \quad (8)$$

де C_p , X , Y – коефіцієнт та показники ступеня, 200; 1,0; 0,75;

Z – число зубців розгортки, 8.

Дивлячись на необхідні умови обробки, можна записати нерівність:

$$N_{ef} \leq N_n \cdot \eta, \quad (9)$$

де N_n – потужність електричного двигуна головного приводу верстату, кВт, 3,0;

η – коефіцієнт корисної дії кінематичного ланцюга від електричного двигуна до різального інструмента, 0,8.

Прирівнявши знову праві частини виразів (7) і (9), матимемо друге технічне обмеження:

$$n \cdot S^Y \leq \frac{1,95 \cdot 10^6 \cdot N_n \cdot \eta \cdot Z^Y}{C_p \cdot t^X \cdot D}; \quad (10)$$

$$n \cdot S^{0,75} \leq \frac{1,95 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 0,8 \cdot 8^{0,75}}{200 \cdot 0,1^{1,0} \cdot 14}.$$

Лінійний вид нерівності (10):

$$x_1 + 0,75x_2 \leq b_2; \quad (11)$$

$$b_2 = 11,28.$$

Третє обмеження враховує мінімальну допустиму частоту обертання шпинделя:

$$n_{B \min} \leq n. \quad (12)$$

Четверте обмеження враховує максимально допустиму частоту обертання шпинделя:

$$n_{B \max} \geq n. \quad (13)$$

Враховуючи технічну характеристику металорізального верстату моделі MAST Metalltechnik M-KBM 50 маємо, що $n_{B \min} = 31,5$ об/хв, $n_{B \max} = 1400$ об/хв.

Тоді маємо наступне:

$$b_3 \leq x_1, \quad (14)$$

де $b_3 = \ln 31,5 = 3,45$;

$$b_4 \geq x_1, \quad (15)$$

де $b_4 = \ln 1400 = 7,24$.

П'яте обмеження враховує мінімальну допустиму подачу:

$$S_{B \min} \leq S. \quad (16)$$

Шосте обмеження враховує максимально допустиму подачу:

$$S_{в max} \geq S. \quad (17)$$

Враховуючи технічну характеристику металорізального верстату та умови обробки маємо, що $S_{в min} = 0,056$ мм/об, $S_{в max} = 0,9$ мм/об.

Тоді маємо наступне:

$$b_5 \leq x_2, \quad (18)$$

де $b_5 = \ln 0,056 = -2,89$;

$$b_6 \geq x_2, \quad (19)$$

де $b_6 = \ln 0,9 = -0,11$.

Окрім того, до технічних обмежень (подано нижче) до моделі вносимо функцію оцінки F_0 :

$$\begin{cases} x_1 + 0,65x_2 \leq 5,67; \\ x_1 + 0,75x_2 \leq 11,28; \\ x_1 \geq 3,45; \\ x_1 \leq 7,24; \\ x_2 \geq -2,89; \\ x_2 \leq -0,11; \\ F = x_1 + x_2 \rightarrow \max. \end{cases} \quad (20)$$

Вирішуємо систему графічно (рис.). Отримаємо результат, зображений на рис.

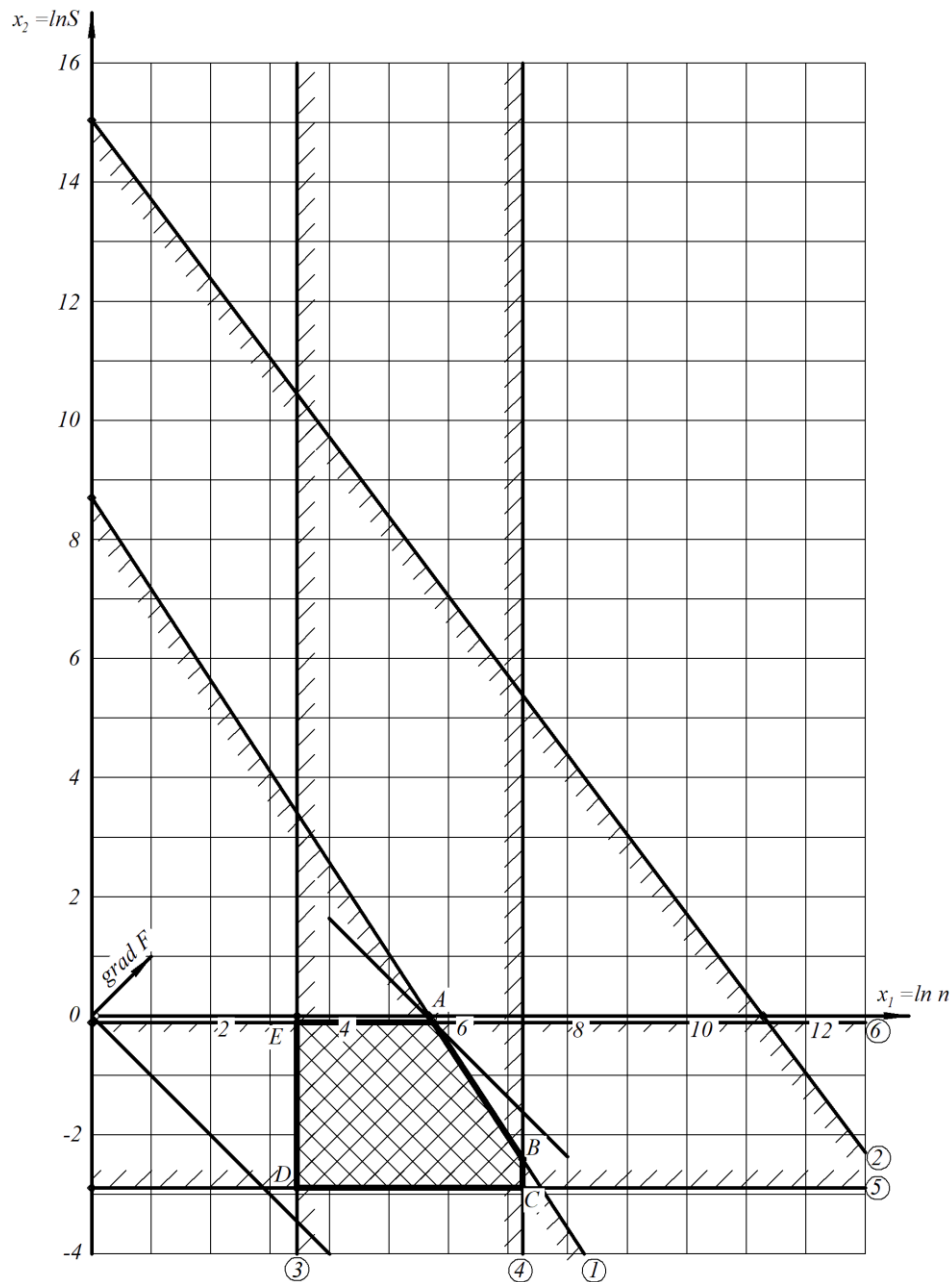


Рис. – Графічний розв'язок математичної моделі розгортання отвору втулки

Екстремальне значення функції оцінки забезпечується саме для x_1 , а також x_2 , що знаходяться в точці. Вона повинна лежати на одній із граничних прямих ліній чи їх перетині. Завдання пошуку оптимальних значень для x_1 , а також x_2 полягає у послідовному визначенні координат усіх можливих точок перетину граничних прямих, а також подальшого визначення для них значення максимальної суми. Оптимальні режими розгортання визначаються після визначення оптимальних координат. Для розв'язку завдання, що задано системою лінійних нерівностей та рівнянь, переважно використовується метод перебору точок, які утворюють багатокутник із можливими рішеннями. Відбувається попарне визначення точок перетину прямих, потім представляються їх координати до нерівностей системи (20). Точка із координатами, що задовольняє усім прямим і одночасна сума яких дає максимальне значення, – точка оптимуму.

Кожне із шести обмежень було представлено граничною прямою, що визначає півплощину. Саме у ній можливе існування рішень наведеної системи. Граничні прямі утворили під час перетину багатокутника розв'язків ABCDE (рис.). Всередині цього багатокутника будь-яка точка відповідатиме усім нерівностям системи (20). Саме в т. А функція приймає максимальне значення. Тобто маємо т. А (5,74; -0,11). На підставі цього визначаємо оптимальне значення режимних параметрів розгортання для частоти обертання n , об/хв, а також подачі S , мм/об:

$$n_{\text{опт}} = \exp(5,74) = 311 \text{ об/хв}, \quad (21)$$

$$S_{\text{опт}} = \exp(-0,11) = 0,9 \text{ мм/об}. \quad (22)$$

Висновки

Під час дослідження було розроблено математичну модель процесу розгортання отвору Ø14H9^(+0,043) мм у втулці зі сталі 45 циліндричного редуктора. Використано кінцеву розгортку зі швидкорізальної сталі Р6М5. Враховано основні технічні обмеження, що визначають реальні умови обробки верстату моделі MAST Metalltechnik M-KBM 50. До складу обмежень увійшли: швидкість; потужність; частота обертання; подача. Критерієм оптимальності визначено максимальну продуктивність обробки, що узгоджується із сучасними тенденціями одночасного збереження необхідного рівня якості. Сформульована система обмежень у вигляді нерівностей. Вони описують взаємозв'язки між технологічними параметрами обробки і технологічними характеристиками верстату та різального інструменту. Завдяки цьому отримана математична модель наближена до умов реального машинобудівного виробництва, що й забезпечує її можливість практичного застосування. Визначення оптимальних режимів різання реалізовано на підставі методу лінійної оптимізації (графічний спосіб). Це дозволило нам відобразити область допустимих розв'язків у вигляді багатокутника, що обмежений граничними

прямими. Останні відповідають технічним умовам процесу.

Визначені оптимальні значення частоти обертання шпинделя та подачі (311 об/хв та 0,9 мм/об) забезпечать досягнення екстремального значення функції оцінки (максимальна продуктивність обробки). Отримані результати підтвердили ефективність математичного моделювання для оптимізації технологічного процесу обробки різанням, що відкриває подальші перспективи його використання у виробничій практиці для підвищення економічної ефективності та конкурентоспроможності підприємств машинобудування.

Перелік використаних джерел

- [1] Попов С. В. Дослідження точності оброблення циліндра різцем із твердого сплаву. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2025. Вип. 15, том 1. С. 105-113. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-12>.
- [2] Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія / Фролов Є. А., Кравченко С. І., Попов С. В., Гнітько С. М. Полтава: НУПІ, 2019. 204 с.
- [3] Пестунов В. М., Свяцький В. В., Придворова С. В. Оптимізація процесу обробки глибоких отворів. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Серія: Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2012. Вип. 25, ч. 1. С. 200-210.
- [4] Оптимізація режимів різання на важких верстатах / Г. П. Клименко та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Технології в машинобудуванні. 2022. № 2(6). С. 43-48. DOI: [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.2\(6\).06](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.2(6).06).
- [5] Карпусь В. Є., Іванова М. С., Котляр О. В. Інтенсифікація процесів механічної обробки у машинобудуванні. *Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України*. 2010. Вип. 1 (15). С. 29-34.
- [6] Waghmare G. H., Mohan R. Optimization of hole-making operations. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. 2014. Vol. 3, No. 4. Pp. 3079-3081.
- [7] Influence of selected technological factors on the hole quality during reaming / Fulemova J., Kutlwaser J., Gombar M., Rehor J. *Intelligent Manufacturing & Automation: Proceedings of the 28th International DAAAM Symposium, Zadar, Croatia, 08-11 November 2017*. Pp. 334-340. DOI: <https://doi.org/10.2507/28th.daaam.proceedings.046>.
- [8] Zubrzycki J., Świć A., Taranenko V. Mathematical model of the hole drilling process and typical automated process for designing hole drilling operations. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 282. Pp. 221-229. DOI:

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.282.221>.

- [9] Solimanpur M., Foroughi A., Mohammadi M. Optimum route selection in hole-making operations using a dynamic programming-based method. *Cogent Engineering*. 2016. Vol. 3, Iss. 1. Article 1201991. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1201991>.

- [10] Паливода Ю. Є., Дячун А. Є., Лещук Р. Я. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки: навчально-методичний посібник. Тернопіль: ТНТУ, 2019. 240 с.

LINEAR OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF GEAR REDUCER BUSHING HOLE REAMING

Popov S.V.

PhD (Engineering), associate professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2381-152X>, e-mail: stanislav.popov@pdau.edu.ua

The article addresses the problem of optimizing the cutting parameters for the reaming of bushing holes in gear reducer assemblies. The quality and dimensional accuracy of internal holes are of critical importance, as they directly determine the reliability of shaft fits, wear resistance of assemblies, and overall durability of the mechanism. Reaming, being the final stage of machining, provides the required precision and surface finish. However, its efficiency strongly depends on correctly selected technological parameters such as spindle speed and feed rate. Improper combinations of these parameters may lead to premature tool wear, increased surface roughness, dimensional deviations and reduced process stability. To solve this problem, a mathematical model of the reaming process was developed with consideration of key technical limitations of the cutting tool and the machine tool, specifically the MAST Metalltechnik M-KBM 50. The model includes constraints related to cutting speed, spindle power, rotational frequency and feed per revolution. The optimization criterion was chosen as maximum machining productivity, which aligns with current industrial trends of increasing efficiency while maintaining the required quality standards. The system of constraints was formulated as inequalities describing the interaction between machining parameters and technological capabilities of the machine-tool system. The optimization task was solved using the linear optimization method in a graphical form. This approach made it possible to represent the feasible solution region as a polygon bounded by limiting lines corresponding to technical restrictions. The optimum point was determined at the intersection of the boundary lines, yielding optimal cutting parameters of 311 rpm spindle speed and 0.9 mm/rev feed rate. These parameters ensure the maximum value of the objective function, i.e., maximum machining productivity, while meeting quality requirements. The obtained results confirm the effectiveness of mathematical modeling in solving practical machining problems, as well as the potential of linear optimization methods for improving process planning in modern mechanical engineering. The proposed approach provides a reliable basis for increasing the economic efficiency and competitiveness of manufacturing enterprises.

Keywords: cutting tool, reaming, bushing, tolerance, machining allowance, spindle speed, feed rate, depth of cut, surface roughness, machining quality.

References

- [1] S.V. Popov, "Doslidzhennia tochnosti obroblennia tsylindra riztsem iz tverdoho splavu" ["Research on the accuracy of cylinder machining with a hard alloy tool"], *Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu – Scientific bulletin of the Tavsia State Agrotechnological University*, vol. 15, no. 1, pp. 105-113, 2025. doi: **10.32782/2220-8674-2025-25-1-12**. (Ukr.)
- [2] Ye.A. Frolov, S.I. Kravchenko, S.V. Popov, and S.M. Hnirko, *Tekhnolohichne zabezpechennia yakosti produktsii mashynobuduvannia: monohrafiia* [Technological support of product quality in mechanical engineering: Monograph]. Poltava, Ukraine: NUPP Publ., 2019. (Ukr.)
- [3] V.M. Pestunov, V.V. Sviatskyi, and S.V. Prydvorova, "Optymizatsiia protsesu obrobky hlybokyykh otvoriv" ["Optimization of deep hole machining process"], *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collection of scientific papers of Kirovograd National Technical University. Series: Technology in agricultural production, industrial mechanical engineering, automation*, no. 25, vol. 1, pp. 200-210, 2012. (Ukr.)
- [4] H.P. Klymenko, V.D. Kovalov, Ya.V. Vasylenko, M.V. Shapovalov, and A.Yu. Shcherbakova, "Optymizatsiia rezhymiv rizannia na vazhkykh verstatakh" ["Optimization of cutting modes on heavy machines"], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Tekhnolohii v mashynobuduvanni – Bulletin of the National technical university «Kharkiv Polytechnic Institute». Series: Techniques in a machine industry*, no. 2(6), pp. 43-48, 2022. doi: **10.20998/2079-004X.2022.2(6).06**. (Ukr.)

- [5] V. Ye. Karpus, M. S. Ivanova, and O. V. Kotliar, "Intensyfikatsiia protsesiv mekhanichnoi obrobky u mashynobuduvanni" ["Intensification of machining processes in mechanical engineering"], *Zbirnyk naukovykh prats Akademii vnutrishnikh viisk MVS Ukrainy – Collection of scientific works of the Academy of Internal Troops of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine*, no. 1(15), pp. 29-34, 2010. (Ukr.)
- [6] G. H. Waghmare, and R. Mohan, "Optimization of hole-making operations," *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, vol. 3, no. 4, pp. 3079-3081, 2014.
- [7] J. Fulemova, J. Kutlwaser, M. Gombar, and J. Rehor, "Influence of selected technological factors on the hole quality during reaming," in *Proceedings of the 28th International DAAAM Symposium «Intelligent Manufacturing & Automation»*, Zadar, Croatia, Nov. 08-11, 2017, pp. 334-340. doi: 10.2507/28th.daaam.proceedings.046.
- [8] J. Zubrzycki, A. Świć, and V. Taranenko, "Mathematical model of the hole drilling process and typical automated process for designing hole drilling operations," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 282, pp. 221-229, 2013. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.282.221.
- [9] M. Solimanpur, A. Foroughi, and M. Mohammadi, "Optimum route selection in hole-making operations using a dynamic programming-based method," *Cogent Engineering*, vol. 3, no. 1, article 1201991, 2016. doi: 10.1080/23311916.2016.1201991.
- [10] Yu. Ye. Palyvoda, A. Ye. Diachun, and R. Ya. Leshchuk, *Instrumentalni materialy, rezhymy rizannia, tekhnichne normuvannia mekhanichnoi obrobky: navchalno-metodychnyi posibnyk* [Tool materials, cutting modes, technical standardization of machining: Educational and methodological manual]. Ternopil, Ukraine: TNTU, 2019. (Ukr.)
- Стаття надійшла 13.09.2025
Стаття прийнята 24.09.2025
Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Попов С. В. Лінійна оптимізація технологічних параметрів розгортання отвору втулки зубчастого редуктора. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 65-71. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344648>.