

**КЛИМЕНКО Г.П., КОВАЛЬОВ В.Д., ВАСИЛЬЧЕНКО Я.В., ШАПОВАЛОВ М.В., ЩЕРБАКОВА А.Ю.**

## ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ВАЖКИХ ВЕРСТАТАХ

Оптимізація процесу різання має велике значення для металообробки в забезпеченні високої якості продукції та підвищенні її конкурентоспроможності. Ефективність лезової обробки металів різанням багато в чому визначається якістю різального інструменту. Ефективна оптимізація вимагає високої якості всіх етапів вибору оптимальних умов різання: задовільних фізико-математичних моделей реального процесу та використання сучасних процедур оптимізації. Підвищення ефективності металообробки ґрунтується на призначенні оптимальних режимів різання. Визначено, що в якості критерію оптимальності виступає економічний: приведені витрати, собівартість та продуктивність. Враховуючи особливості різання на важких верстатах, сформовано цільовий функціонал приведених витрат і продуктивності. Враховуються обмеження конструкції верстата та інструмента, матеріали оброблюваних та інструментальних, період стійкості, а також обмеження, обумовлені якістю процесу експлуатації інструменту. Оптимізація режимів різання здійснюється одночасно за двома змінним – подачею  $S$  та швидкістю різання  $V$ . оптимальні режими різання повинні забезпечувати максимум середньої продуктивності або мінімум середньої собівартості. При використанні декількох критеріїв оптимальності оптимізація проводиться по кожному з них, а прийняття остаточного рішення відбувається шляхом порівняння отриманих значень. Середній фактичний період стійкості різального інструменту є величиною випадковою. Прийнято, що період стійкості твердосплавних інструментів на важких верстатах розподіляється за законом Вейбулла. Встановлено, що процес різання характеризується великою кількістю взаємозалежних чинників, які впливають як на протікання, так і на результат процесу. У разі підвищених вимог до стабільності технологічного процесу обробки деталей при визначенні раціональних режимів різання враховується також надійність інструменту

**Ключові слова:** оптимізація, режими різання, важкий верстат, критерій оптимальності, приведені витрати, продуктивність

### KLYMENKO G.P., KOVALOV V.D., VASYLCHENKO YA.V., SHAPOVALOV M.V., SHERBAKOVA A. YU. OPTIMIZATION OF CUTTING MODES ON HEAVY MACHINES

The optimization of the cutting process is of great importance for metalworking in ensuring the high quality of products and increasing its competitiveness. Increasing the efficiency of metalworking is based on the designation of optimal cutting parameters. It is determined that the economic criterion is the criterion of optimality: discounted costs, prime cost and productivity. The objective functional of the discounted costs and productivity which considers feature of cutting on heavy machines is generated. The limitations of the design of the machine and tool, work material and tool material, tool life, as well as the limitations caused by the quality of the tool operation is taken into account. Optimization of cutting modes is carried out simultaneously by two variables - feed  $S$  and cutting speed  $V$ . Optimal cutting modes should provide the maximum average productivity and minimum average cost. If several optimality criteria are used, optimization is performed for each of them. The final decision is made by comparing the obtained values. The average actual tool life is a random value. It was accepted that the durability period of carbide tools on heavy machine tools was distributed according to the Weibull law. It is established that the cutting process is characterized by a large number of interrelated factors influencing both the course and the result of the process. With increased requirements to the stability of the technological process of machining of parts, in determining the rational cutting parameters, the tool reliability is also taken into account

**Keywords:** cutting parameters, heavy machine, optimality criterion, discounted costs, productivity.

**Вступ.** Широке впровадження нових конструкційних і інструментальних матеріалів, високопродуктивного обладнання з ЧПУ та адаптивних систем управління, передбачає застосування сучасного підходу до проектування технологічних систем. Вимоги, що пред'являються до вискоефективної металообробки, припускають раціональну експлуатацію дорогого устаткування, програмного забезпечення та ріжучого інструменту. У зв'язку з цим задачам оптимізації та управлінню процесом різання приділяється велика увага.

Оптимізація процесу різання має велике значення для металообробки в забезпеченні високої якості продукції та підвищенні її конкурентоспроможності.

**Аналіз стану питання.** Існуючі методи оптимізації можна поділити на дві широкі категорії: методи умовної оптимізації та методи безумовної оптимізації (рис. 1).

Процес різання характеризується великою кількістю взаємозалежних чинників, які впливають як на протікання, так і на результат процесу. Підвищення ефективності металообробки ґрунтується в призначенні оптимальних режимів різання. Як правило, метою оптимізації процесу різання є підвищення якості продукції при одночасному зниженні її вартості. Ефективна оптимізація вимагає високої якості всіх етапів вибору оптимальних умов різання: задовільних фізико-математичних моделей реального процесу та використання сучасних процедур оптимізації. Для оптимізації процесу точіння автори з різних областей використовували різні підходи до вибору способу оптимізації, який включає в себе розробки математичних моделей та використання певного алгоритму, здатного оптимізувати ці моделі.

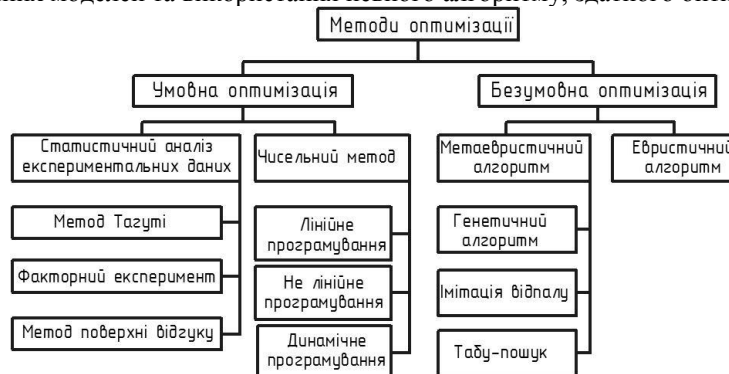


Рис. 1 – Класифікація методів оптимізації

Процес різання характеризується великою кількістю взаємозалежних чинників, які впливають як на протікання, так і на результат процесу. Підвищення ефективності металообробки ґрунтується в призначенні оптимальних режимів різання. Як правило, метою оптимізації процесу різання є підвищення якості продукції при одночасному зниженні її вартості. Ефективна оптимізація вимагає високої якості всіх етапів вибору оптимальних умов різання: задовільних фізико-математичних моделей реального процесу та використання сучасних процедур оптимізації. Для оптимізації процесу точіння автори з різних областей використовували різні підходи до вибору способу оптимізації, який включає в себе розробки математичних моделей та використання певного алгоритму, здатного оптимізувати ці моделі.

В роботі [1] в якості критерію оптимальності прийнята мінімальна собівартість продукції. Швидкість різання, подача і глибина різання використовувались в якості системних змінних. Авторами розроблена математична модель з декілька змінними. В якості обмежень в заданих діапазонах використовувались: обмеження параметрів різання (швидкості різання  $V$ , подачі  $S$  та глибини різання  $d$ ), обмеження терміну служби інструменту ( $T_p$ ) і експлуатаційні обмеження (якості поверхні, сили різання та потужності). Операція попереднього точіння та чистового точіння мають свої власні обмеження, тому вони розглядаються окремо.

Мінімальна собівартість одиниці продукції, за винятком матеріальних витрат розраховувалась за формулою:

$$UC = CI + CM + CR + CT, \quad (1)$$

де  $CI$  – витрати за простій обладнання через операції завантаження та розвантаження (\$/шт.);

$CM$  – вартість обробки за фактичним часом різання (\$/шт.);

$CR$  – вартість заміни інструменту (\$/шт.);

$CT$  – вартість інструменту за рахунок заміни зношеного інструменту (\$/шт.).

Для оптимізації використовувався традиційний диференціальний метод і метод динамічного програмування.

В роботі [2] для забезпечення мінімальної собівартості виготовлення продукції при обробці заготовки з титанового сплаву використовувався «метод покоординатного спуску» для багатовимірних функцій. Розроблено математичні моделі та алгоритми оптимізації, що відображають взаємозв'язок параметрів режиму різання з такими критеріями якості, як продуктивність ( $\Pi$ ), собівартість ( $C$ ), ресурс ріжучого інструменту ( $T$ ) і шорсткість обробленої поверхні ( $Rz$ ). Вихідні дані, що включають в себе дані розрахунку критеріїв  $\Pi$ ,  $T$ ,  $C$ ,  $Rz$ , зображені у вигляді залежностей  $\Pi = f(V)$ ,  $T = f(V)$ ,  $C = f(V)$ ,  $Rz = f(V)$ . Допустимі значення початкових параметрів розглядаються як обмеження. Оптимізація виконується через варіації початкових параметрів у заданих обмежених діапазонах. Оптимальне рішення представляється з урахуванням коригованих значень параметрів, коли цільова функція приймає екстремальне значення  $F_{\min}$  (або  $F_{\max}$ ) для певного критерію ефективності.

Серед іноземних авторів розповсюджений пошук рішень для задач оптимізації багатопрохідної токарної обробки. Про це свідчить аналіз методів, проведений авторами [3]. В роботі сформульована модель основної сили різання з використанням методу поверхні відгуку, а також запропонована оптимізація параметрів обробки з використанням генетичного алгоритму для її мінімізації. Метод поверхні відгуку визнано успішною методикою для аналізу тенденції зміни сили різання відносно різних комбінацій розрахункових параметрів, включаючи швидкість різання ( $V_c$ ), подачу ( $S_0$ ) та глибину різання ( $t$ ). Це поєднання експериментального та регресійного аналізу, а також статистичних висновків. В даній роботі сила різання  $P_z$  представлена в якості функції від швидкості різання  $V_c$  та подачі  $S_0$ . Поверхня відгуку виражається як:

$$P_z = f(V_c, S_0, t) + e, \quad (2)$$

де  $e$  – це помилка, яка звичайно розподіляється з нульовим середнім відповідно до відгуку, який спостерігається.

Оптимальне значення параметрів різання вибрано таким чином, щоб звести до мінімуму основну силу різання, необхідну для токарної обробки, і, таким чином, знизити споживання енергії, знос інструменту, шуми і вібрацію, поліпшуючи чистоту поверхні.

В останнє десятиліття продовжують привертати увагу дослідників гібридні методи оптимізації завдяки їх здатності вирішувати складні комбінаторні задачі оптимізації. Дослідження [4] довели необхідність розробки надійного інструменту для пошуку найкращих параметрів обробки. В роботі розроблено алгоритм гібридного імітаційного відпалу для мінімізації собівартості виробництва при багатопрохідному точінні. Такий підхід заснований на поєднанні методу локального пошуку в алгоритмі імітації відпалу з глобальною оптимізацією генетичним алгоритмом, що дає можливість уникати локальних мінімумів та значно покращувати продуктивність. В якості математичної моделі використовувалась модель мінімізації вартості виготовлення одиниці продукції, запропонована в роботі [1]. В роботі враховуються обмеження, включаючи граничні параметри, та обмеження режимів різання на інструмент та заготовку. В роботі доведена ефективність даного гібридного методу оптимізації.

**Метою роботи** є підвищення ефективності металообробки на важких верстатах за рахунок призначення оптимальних режимів різання..

**Матеріали, обладнання та умови проведення досліджень.** Експериментальні дослідження базувалися на теоріях регресивного і кореляційного аналізів, математичної статистики з використанням методики форсованих, прискорених, тривалих іспитів, моментних спостережень, інформаційних банків, евристичних методів.

Експериментальні дослідження було проведено на верстатах з  $D_{\max} = 1250-2500$  мм із висотою різця від 40 до 80 мм. Дослідженню підлягали різальні пластини однієї партії з твердих сплавів, які рекомендовано для обробки на важких верстатах. Геометричні параметри різальної частини різців для всіх випробувань приймалися згідно з нормами заводу. Випробування проводилися при глибині різання 5–30 мм зі швидкістю різання приблизно відповідною 0,25–2,0 від економічної швидкості для даних умов. У межах однієї серії випробувань залишалися

незмінними верстат, заготовка, партія різців і партія твердосплавних пластин. Наприклад, одержані залежності стійкості на токарному верстаті мод. КЖ16274Ф3 модульними різцями висотою державки  $H = 45$  мм при обробці валків зі сталі 90ХФ, з режимами:  $t = 12$  мм,  $S = 1,6$  мм/об.,  $v = 52$  м/хв. Отримані результати статистично оброблялися.

**Результати досліджень.** Сучасний підхід до вирішення задачі вибору оптимальних умов різання ґрунтується на використанні методів математичного програмування. Відповідно до цього підходу постановка задачі оптимізації режимів різання полягає в тім, щоб за даними вимогами до виготовленої деталі та відомими параметрами системі ВПД необхідно знайти параметри процесу різання, що забезпечують екстремальне значення критерію оптимальності технологічного процесу. Математичне формулювання даної задачі може бути записано в такий спосіб [5]:

$$\text{extr}W(\bar{X}); \quad \bar{X} \in D; D = \{\bar{X}: f_i(\bar{X}) \leq b_i; i = \overline{1, n}\}, \quad (3)$$

$$X = \begin{pmatrix} V \\ S \\ t \\ \gamma \end{pmatrix}; V > 0; S > 0; \gamma > 0;$$

де  $W(\bar{X})$  – критерій якості режиму різання (частина критерію оптимальності технологічного процесу, що залежить від умов різання);  $\bar{X}$  – параметри умов різання, що представляють собою  $n$ -мірний вектор з координатами;  $V$  – швидкість різання,  $S$  – подача,  $t$  – глибина різання;  $\gamma$  – передній кут.  $D$  – множина допустимих умов різання, що визначається обмеженнями, накладеними на елементи процесу різання у вигляді нерівностей  $f_i(\bar{X}) \leq b_i$ , де

$f_i(\bar{X})$  – деяка функція умов різання;  $b_i$  – відомі константи.

В якості цільової функції  $W(\bar{X})$  у математичній моделі (3) зазвичай використовують або економічні критерії або технологічні. Залежно від конкретної виробничої ситуації економічними критеріями оптимізації можуть бути: мінімальна технологічна собівартість, максимальна продуктивність оброблення та ресурс інструмента.

З метою автоматичного управління процесом механічної обробки на токарних верстатах з ЧПУ важливо забезпечити оптимальне значення швидкості різання. Математичні моделі для цього будуються з урахуванням заданих критеріїв оптимальності. В якості критерію оптимальності при призначенні режимів різання зазвичай беруть витрати часу на обробку однієї деталі (штучний час), або собівартість обробки однієї деталі. Таким чином, оптимальні режими різання повинні забезпечувати максимум середньої продуктивності або мінімум середньої собівартості.

Змінна частина технологічної собівартості  $C$ , що залежить від налагодження та режиму різання, при роботі одним інструментом визначається за формулою:

$$C = \tau_0 + \tau_{зм} \frac{\tau_0}{T} + 3_i \frac{\tau_0}{T}, \quad (4)$$

де  $\tau_0$  – основний технологічний час (час, затрачений на безпосередню зміну геометричної форми і розмірів заготовки, що є ціллю даного переходу), хв.:

$$\tau_0 = \frac{l}{nS},$$

де  $l$  – розрахункова довжина робочого ходу у напрямку руху подачі, рівна сумі довжини  $l_3$  оброблюваної ділянки заготовки, шляху  $l_{ар}$  врізання головної ріжучої кромки інструмента у зрізаний шар і шляху  $l_n$  перебігу, необхідного для виходу інструмента із контакту з заготовкою.

$\tau_{зм}$  – час простою верстата у зв'язку із заміною інструмента;

$3_i$  – витрати, пов'язані з експлуатацією інструмента за період його стійкості:

$$3_i = \tau_{зм} E_H + C_{зат} + \frac{(C_{п} - C_{відх}) K_B}{j+1},$$

де  $E_H$  – номінальна заробітна плата наладчика за хвилину;  $C_{зат}$  – вартість загострення інструмента, що затупився;  $C_{п}$  – початкова вартість інструмента;  $C_{відх}$  – вартість відходів інструмента;  $K_B$  – коефіцієнт, що враховує випадкову втрату інструмента;  $j$  – число переточувань, що допускається інструментом до його повної амортизації.

Продуктивність оброблення  $\Pi$  визначають через штучний час  $\tau_{шт}$ :

$$\Pi = \frac{1}{\tau_{шт}}, \quad (5)$$

$$\tau_{шт} = \tau_0 + \tau_{зм} \frac{\tau_0}{T} + \sum \tau, \quad (6)$$

де  $\sum \tau = \tau_{доп} + \tau_{об} + \tau_в$ ;  $\tau_{доп}$  – допоміжний час, затрачений на встановлення заготовки на верстаті, зняття її або готової деталі з верстата, пуск і зупинка верстата і т.п.;  $\tau_{об}$  – час організаційного та технічного обслуговування робочого місця;  $\tau_в$  – час перерв та відпочинку.

Відома стійкісна залежність, що враховує знос ріжучого інструменту:

$$T = \frac{C_{TV} V^k}{e^{k_1 V S^q}}.$$

На рис.2 представлена залежність технологічної собівартості оброблення від швидкості різання та подачі при роботі твердосплавним інструментом.

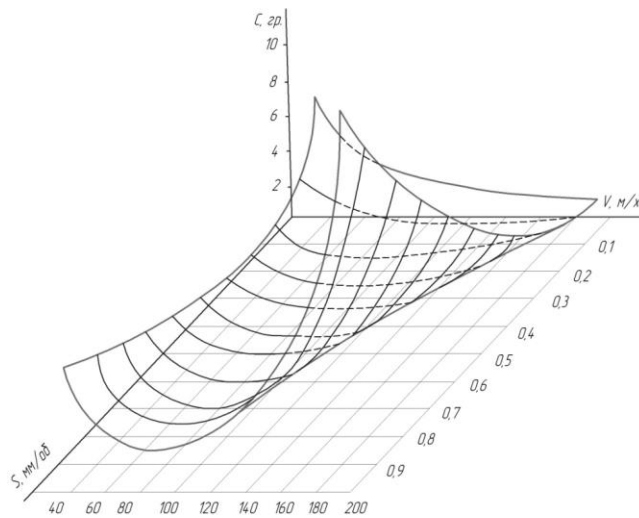


Рис. 2 – Залежність технологічної собівартості оброблення від швидкості різання та подачі

Статистичні дослідження показали, що 45% ріжучого інструменту (PI) при роботі на важких верстатах виходить із ладу в результаті поломок. Тому необхідно враховувати ймовірність руйнування та рівень надійності PI. Для цього в роботі [6] визначено цільові функції та стійкісну залежність інструменту з урахуванням цих параметрів. При цьому прийнято, що період стійкості твердосплавних інструментів на важких верстатах розподілявся по закону Вейбулла з параметрами  $a$  та  $b$ , а в якості економічного критерію оптимальності приймаються приведені витрати, які залежать не тільки від традиційних параметрів, а також від ймовірності руйнування інструменту  $q$ , від кількості періодів стійкості інструмента  $K$  та від рівня надійності  $\gamma$  PI.

При формуванні цільової функції враховувались лише ті витрати, які залежать від режиму обробки. Цільова функція, що виражає приведені витрати на знімання одиниці об'єму металу з заготовки за період стійкості інструменту приймає вигляд:

$$\Pi = \frac{1}{V \cdot S} \left( E + \frac{\tau_3 E}{T(V, S, t, q, \gamma)} + \frac{A_{ин}}{K(q, S) \cdot T(V, S, t, q, \gamma)} \right), \quad (8)$$

де  $E$  - приведені витрати без урахування вартості інструмента, що припадають на одну хвилину роботи верстата, коп. / ст.-хв;

$$E = \bar{E} + \varepsilon K, \quad (9)$$

де  $\bar{E}$  - середня собівартість верстатогодиниці (без вартості ріжучого інструменту) коп/ст-хв;

$\varepsilon$ -галузевий нормативний коефіцієнт економічної ефективності  $\varepsilon = 0,12$ ;

$K$  – питомі додаткові витрати, зумовлені капітальними вкладеннями,

$\tau_3$  – час простою верстата, пов'язаний із заміною інструменту;

$A_{ин}$  – приведені витрати, обумовлені експлуатацією інструменту, грн.;

$T(V, S, t, q_p, \gamma)$  – середній період стійкості різального інструменту з урахуванням його зношування та руйнування й розсіювання властивостей;

$$T = \frac{C_v^{y_v} (0.108 q_p^{0.68} D_c^{0.15} - q_p + 1) \cdot \eta}{v^{y_v} \cdot S^{y_s} \cdot t^{y_t}}, \quad (10)$$

де  $V, S, t$  – складові режиму різання (швидкість різання, подача та глибина відповідно);

$m_v, x_v, y_v$  – показники ступеня стійкісної залежності;

$q_p$  – ймовірність руйнування інструменту;

$K(q, S)$  – число періодів стійкості інструменту з урахуванням ймовірності його руйнування: для переточуваних пластин  $K=1/q$ ; для багатограних непереточуваних пластин з числом граней  $Z$ :  $K=Z(1-q)$ ;

$\eta$  - поправочний коефіцієнт на період стійкості, що враховує його розсіювання.

В даному випадку оптимізація режимів різання здійснюється одночасно за двома змінним – подачею  $S$  та швидкістю різання  $V$ . При використанні декількох критеріїв оптимальності оптимізація проводиться по кожному з них, а прийняття остаточного рішення відбувається шляхом порівняння отриманих значень.

Середній фактичний період стійкості  $PI$  є величиною випадковою. Він залежить від ймовірності появи відмови відповідного виду (знос або руйнування)[7]. Середній період стійкості  $PI$ , який залежить від його зносостійкості та міцності визначається за формулою:

$$T = q_z \cdot T_z + q_p \cdot T_p = T_z \cdot x, \tag{11}$$

де  $T_z$  та  $T_p$  – середні періоди стійкості, обумовлені відповідно зносом і руйнуванням інструменту;  $q_z$  та  $q_p$  – ймовірності появи відмови відповідно зносу і руйнування ( $q_z + q_p = 1$ , враховуючи, що сума ймовірностей зносу і руйнування дорівнює одиниці);  $x$  – коефіцієнт, що враховує зміну періоду стійкості у зв'язку з руйнуванням інструменту.

При статистичних дослідженнях стійкості  $PI$  встановлено, що при ручному управлінні важкими верстатами робочий корегує період стійкості (режими різання) з урахуванням ергономічних факторів, пов'язаних з навантаженнями на робочого. Зі збільшенням розмірів верстата економічна стійкість падає, так як зменшується відношення витрат на інструмент до витрат на верстат і його експлуатацію. Разом з цим при точінні великогабаритних деталей на важких верстатах при  $D_c > 1600$  мм спостерігається збільшення фактичної стійкості  $PI$ . Це обумовлено наступними особливостями: заміна інструменту проводиться з супортного майданчика; збільшується маса інструменту в зв'язку зі збільшенням його розмірів; погіршується можливість спостереження за зоною різання через великі габарити оброблюваних деталей. Перераховані особливості призводять до істотного фізичного і психічного навантаження на верстатника, що, в свою чергу, впливає на зниження середнього часу відновлення процесу різання. На рис.3 наглядно показано зміну періоду стійкості.

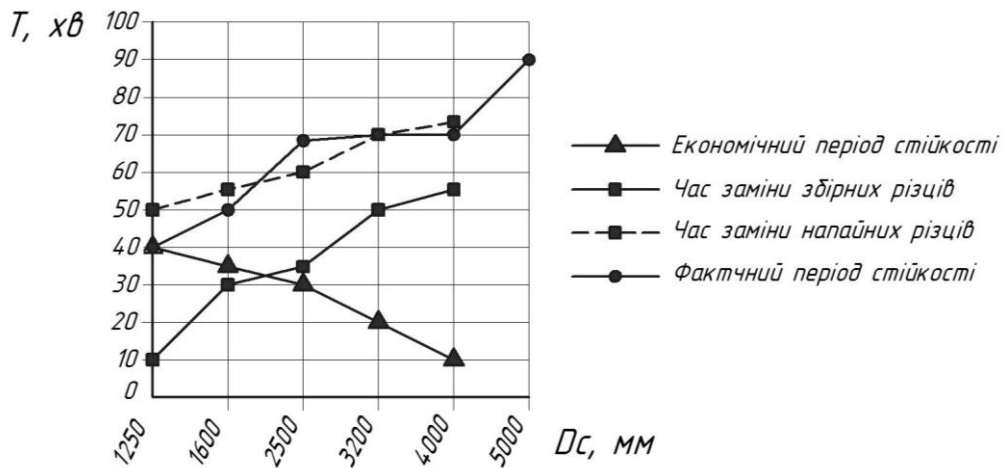


Рис. 3 – Періоди стійкості різців та час їх заміни

З урахуванням рівня надійності  $\gamma$   $PI$ , а також ймовірності його руйнування  $q$ , цільові функції приймають вигляд:

$$\Pi = \frac{E}{S \cdot V} + \frac{\frac{\gamma}{100} \tau_{з.п.} a_{нас.} + (1 - \frac{\gamma}{100}) \tau_{з.а.} (E_1 + a_{нас.})}{T_\gamma S \cdot V} + \frac{\frac{\gamma}{100} \cdot \frac{A_{ин}}{K_1} + (1 - \frac{\gamma}{100}) \cdot \frac{A_{ин}}{K_2}}{\omega T_\gamma S \cdot V}, \tag{12}$$

де  $E$  і  $E_1$  – відповідно вартість хвилини роботи і простою верстата, коп-хв;

$V, S$  – відповідно швидкість різання, м/хв., подача, мм/об;

$\tau_{з.п.}, \tau_{з.а.}$  – час відповідно профілактичної та аварійної заміни інструментів, хв;

$a_{нас.}$  – вартість однієї хвилини часу заміни та настройки інструменту, коп-хв;

$A_{ин}$  – вартість інструменту, коп;

$K_1, K_2$  – число періодів стійкості інструменту відповідно при його профілактичній та аварійній заміні: для різців з механічним кріпленням пластин

$$K_1 = Z, K_2 = Z(1 - q_p),$$

де  $Z$  – кількість граней пластини,  $q_p$  – ймовірність руйнувань граней пластини  $P$ , пов'язаних з подачею;

$\omega$  – коефіцієнт, що враховує зменшення  $T_\gamma$  при аварійній заміні інструменту (ймовірність аварійного відмови):

$$\omega = 1 - \frac{T_{(\gamma)}^b}{a^b(b+1)} + \frac{T_{(\gamma)}^{2b}}{a^{2b}(2b+1)} \frac{T_{(\gamma)}^{3b}}{a^{3b}(3b+1)} + \frac{T_{(\gamma)}^{4b}}{a^{4b}(4b+1)}$$

Період стійкості, що відповідає певному рівню надійності інструменту  $\gamma$  (гамма відсотку):

$$T_{\gamma} = T\eta = a \left( -\ln \frac{\gamma}{100} \right)^{1/b},$$

де  $\eta$  – поправочний коефіцієнт на період стійкості PI, що враховує рівень надійності:

$$\eta = \frac{\left( -\ln \frac{\gamma}{100} \right)^{1/b}}{K_b}$$

**Висновки.** Аналіз вітчизняної та закордонної літератури дозволив виявити найбільш використовувані критерії оптимальності режимів різання – економічні: приведені витрати, собівартість, продуктивність (їх змінні частини, які залежать від режимів різання). Враховуючи особливості різання на важких верстатах, сформовано цільовий функціонал приведених витрат і продуктивності. Включення до цільових функцій зв'язків стійкості та числа періодів стійкості, обумовлених міцністю інструменту, з елементами режиму різання, дозволило отримати екстремум цільового функціоналу переважно в області режимів різання, вільній від обмежень, що спрощує завдання визначення раціональних регламентів експлуатації. При визначенні раціональних елементів режимів різання при чорновому точінні на важких токарних верстатах враховуються обмеження конструкції верстата та інструмента, матеріали оброблюваний та інструментальний, період стійкості, а також обмеження, обумовлені якістю процесу експлуатації інструменту. У разі підвищених вимог до стабільності технологічного процесу обробки деталей при визначенні раціональних режимів різання враховується надійність інструменту.

#### Список літератури

1. Y. C. Shin and Y. S. Joo Optimization of machining conditions with practical constraints / International Journal of Production Research, Vol. 30, No. 12, pp. 2907–2919, 1992.
2. M Bogoljubova, A Afonarov, V Kozlov and O. Sumtsova Mathematical simulation and optimization of cutting modes in turning of titanium alloy workpieces / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124 (2016) 012045 doi:10.1088/1757-899X/124/1/012045.
3. Bhuiyan, T. and Ahmed, I. Optimization of Cutting Parameters in Turning Process / SAE Int. J. Mater. Manf. 7(1):2014, doi : 10.4271/2014-01-9097.
4. Abdelouahhab Jabri, Abdellah El Barkany, and Ahmed El Khalfi Multipass Turning Operation Process Optimization Using Hybrid Genetic Simulated Annealing Algorithm / Hindawi Modeling and Simulation in Engineering Volume 2017, Article ID 1940635, 10 pages.
5. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів: підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосолов, Ф.Я. Якубов ; під заг. ред. М.П. Мазура. – Львів : Новий Світ–2000, 2010. – 422 с.
6. Клименко Г.П. Основы рациональной эксплуатации режущего инструмента : Учеб. пособие. – Краматорск: ДГМА, 2006. – 200 с.
7. Клименко Г. П. Определение рациональных регламентов эксплуатации инструментов для тяжелых станков с ЧПУ / Г. П. Клименко, Я. В. Васильченко, А. Н. Лищенко // Резание и инструмент в технологических системах = Cutting & tool in technological system : междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2016. – Вып. 86. – С. 49-56.

#### References (transliterated)

1. Y. C. Shin and Y. S. Joo Optimization of machining conditions with practical constraints / International Journal of Production Research, Vol. 30, No. 12, pp. 2907–2919, 1992.
2. M Bogoljubova, A Afonarov, V Kozlov and O. Sumtsova Mathematical simulation and optimization of cutting modes in turning of titanium alloy workpieces / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124 (2016) 012045 doi:10.1088/1757-899X/124/1/012045.
3. Bhuiyan, T. and Ahmed, I. Optimization of Cutting Parameters in Turning Process / SAE Int. J. Mater. Manf. 7(1):2014, doi : 10.4271/2014-01-9097.
4. Abdelouahhab Jabri, Abdellah El Barkany, and Ahmed El Khalfi Multipass Turning Operation Process Optimization Using Hybrid Genetic Simulated Annealing Algorithm / Hindawi Modeling and Simulation in Engineering Volume 2017, Article ID 1940635, 10 pages.
5. Mazur M.P. Osnovy teoriiy rizannya materialiv: pidruchnyk [dlya vyshch. navch. zakladiv] / M.P. Mazur, YU.M. Vnukov, V.L. Dobroskok, V.O. Zaloha, YU.K. Novos'olov, F.YA. Yakubov ; pid zah. red. M.P. Mazura. – L'viv : Novyy Svit–2000, 2010. – 422 s.
6. Klimentko G.P. Osnovy ratsional'noy ekspluatatsii rezhushchego instrumenta : Ucheb. posobiye. – Kramatorsk: DGMA, 2006. – 200 s.
7. Klimentko G. P. Opredeleniye ratsional'nykh reglamentov ekspluatatsii instrumentov dlya tyazhelykh stankov s CHPU / G. P. Klimentko, YA. V. Vasil'chenko, A. N. Lishenko // Rezaniiye i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh = Cutting & tool in technological system : mezhdunar. nauch.-tekhn. sb. – Khar'kov : NTU "KHPI", 2016. – Vyp. 86. – S. 49-56.

Поступила (received) 03.04.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Клименко Галина Петрівна (Klymenko Galyna Petrivna)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1022-6324>; e-mail: [galynaklymenko1@gmail.com](mailto:galynaklymenko1@gmail.com)

**Ковальов Віктор Дмитрович (Kovalev Viktor Dmytrovych)** – доктор технічних наук, професор, ректор Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5091-5856>, e-mail: [kovalov.viktor@gmail.com](mailto:kovalov.viktor@gmail.com)

**Васильченко Яна Василівна (Vasylchenko Yana Vasylivna)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4566-8827>, e-mail: [wasilchenko.ua@gmail.com](mailto:wasilchenko.ua@gmail.com)

**Шаповалов Максим Валерійович (Shapovalov Maksym Valeriyovych)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8039-8834>, e-mail: [harleymax1979@gmail.com](mailto:harleymax1979@gmail.com)

**Шербаківа Анастасія Юрївна (Sherbakova Anastasiya Yuriyivna)** – аспірант кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: , e-mail: [shebakova.anastasiya1989@gmail.com](mailto:shebakova.anastasiya1989@gmail.com)