

Євген Пуховський¹, Володимир Фролов², Сергій Сапон³, Юрій Бецко⁴

¹доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: puhovskij50@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7843-0922>. ResearcherID: HDN-2044-2022

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: v.k.frolov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3697-286x>. ResearcherID: ACH-0071-2022

³кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій машинобудування та деревообробки
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: s.sapon@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>. ResearcherID: G-7764-2014

⁴старший викладач кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: betsko.uri@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7283-2207>. ResearcherID: ABT-9861-2022

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ВЕРСТАТАХ ГНУЧКИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

Досягнення високих показників точності і якості обробки деталей у сучасних технологічних системах потребує дослідження специфічних особливостей гнучкого виробництва. В умовах гнучких виробничих систем (ГВС) змінність номенклатури оброблюваних деталей зумовлює виникнення цілого комплексу змінних факторів, які визначають розсіювання вихідних параметрів точності і якості оброблюваних деталей. При обробці на взаємопов'язаних верстатах ГВС оптимальними вважаються режими різання, які забезпечують стабільну роботу всього обладнання ГВС протягом тривалого часу. Стабілізація показників точності і якості обробки досягається шляхом адаптивного управління процесом. В статті на прикладі дослідження токарної обробки на взаємопов'язаних верстатах з ЧПК представлена методика розрахунку та оптимізації режимів різання, яка дає можливість підвищити ефективність використання обладнання та знизити собівартість оброблення деталей у груповому циклі.

Ключові слова: оптимізація; гнучка виробнича система; собівартість; режим різання; точність оброблення.
Рис.: 3. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. При досягненні високих показників якості й точності деталей в умовах гнучкого автоматизованого виробництва, крім традиційних, додаються труднощі, пов'язані з повною автоматизацією технологічного процесу: автоматичне базування та закріплення заготовок, інструмента, передача й переорієнтування деталей для обробки на різних верстатних модулях, накопичення похибок при базуванні заготовок із застосуванням технологічного оснащення супутникового типу, розгалуженість розмірних зв'язків багатопільових верстатів, похибки автоматичного налагодження та позиціонування інструмента, необхідність активного контролю оброблюваної поверхні та стану різального інструмента, забезпечення зворотного зв'язку між реальною та заданою точністю, автоматичне підтримання теплових характеристик верстатного обладнання, забезпечення оптимальних для всіх верстатів ГВС режимів різання [1; 2; 3]. З метою забезпечення ефективності групових технологічних процесів механічної обробки комплексних деталей або комплексного поєднання елементів поверхонь деталі в процесі їх розробки необхідно вирішити задачу оптимізації параметрів механічної обробки відповідно до прийнятих критеріїв оптимальності й з урахуванням основних технічних обмежень [3; 4; 5]. При цьому розглядається як оптимізація постійно заданих режимів обробки для конкретного інструментального групового налагодження з використанням методів математичного моделювання та автоматизованої обробки інформації, так і безперервна оптимізація за допомогою систем управління технологічним обладнанням, які входять до складу ГВС [6; 7; 8]. Тому надзвичайно актуальною постає проблема розрахунку та оптимізації режимів різання на верстатах з ЧПК, що входять до складу ГВС.

Постановка проблеми. Режими різання на взаємопов'язаних верстатах ГВС повинні забезпечувати не найвищу продуктивність окремого верстата, а стабільну роботу обладнання ГВС протягом тривалого часу. При цьому оптимальними вважаються не максимально інтенсивні режими обробки, а саме такі, що забезпечують сталу роботу ГВС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Японські виробники свідомо занижують інтенсивність режимів різання та отримують безперебійну роботу ГВС протягом всієї зміни [2; 10]. Такий підхід оснований на адаптивному управлінні верстатами, застосуванні сучасних засобів активного контролю та діагностики обладнання [8; 10; 11]. Проектування оптимального технологічного процесу у змінних умовах гнучкого виробництва є дуже складним завданням, що зумовлено багатоваріантністю технології оброблення деталей, які входять до групи. Тим часом, у теорії групового виробництва є методи, що дозволяють оптимізувати процеси вибору технологічних рішень [12; 13; 14]. У роботі [15] представлено стратегію оптимізації, програмне забезпечення для вибору економічних режимів різання при однопрохідній токарній обробці з використанням детермінованого підходу. Оптимізація заснована на критеріях максимальної продуктивності та включає безліч практичних обмежень.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на велику кількість робіт, що описують ГВС, їх проектування та оптимізацію, існує потреба в наявності структурованих, практично орієнтованих методик оптимізації та розрахунку режимів різання для обробки на взаємопов'язаному обладнанні, яке складає гнучкі виробничі системи.

Метою статті є розробка методики розрахунку та оптимізації режимів різання на взаємопов'язаному обладнанні гнучких виробничих систем, яка дає можливість підвищити ефективність використання обладнання та знизити собівартість оброблення деталей у груповому циклі.

Виклад основного матеріалу. Оптимізацію режимів обробки можна розглянути на прикладі ГВС обробки тіл обертання, у комплекс основною обладнання якої включені токарні верстати з ЧПК. Одною з найважливіших умов оптимізації технологічних процесів є наявність математичного забезпечення, яке базується на математичній моделі процесу. У загальному випадку математична модель процесу являє собою сукупність цільових функцій та обмежуючих умов, які описують статичні та динамічні зв'язки між елементами об'єкта або цілими технологічними об'єктами.

Основна особливість процесу токарної обробки полягає у взаємопов'язаності явищ, які супроводжують процес обробки та впливають на вибір компонентів математичної моделі. До таких процесів, зокрема, належать: силові процеси, процеси тертя і теплоутворення, пов'язані з процесом різання та пластичними деформаціями в зоні різання; електро- та гідродинамічні процеси у приводах робочих органів верстата; зношування різального інструмента, пружні деформації елементів верстата тощо.

Найбільш суттєвими факторами, що впливають на показники точності, продуктивності, економічності механічної обробки є нерівномірності припуску оброблюваної заготовки і твердості оброблюваного матеріала, флуктуації деформацій пружної системи верстатів, а також швидкість зношування та різальні властивості інструментів.

Оскільки процес токарної обробки на верстатах з ЧПК нестационарний, тобто обробку виконують зі змінними режимами різання, показники оптимальності необхідно представляти у вигляді функцій собівартості обробки та продуктивності обладнання.

Собівартість обробки:

$$C = ET + \mathcal{E} / \left(\int_0^T v(\tau) s(\tau) t(\tau) dt \right), \quad (1)$$

де $E = BC_1$; $\mathcal{E} = \pi Dh_n (BT_{zm} + I) K_c$; $C_1 = \pi Dh_n$.

Продуктивність обладнання

$$P = \int_0^T v(\tau) s(\tau) t(\tau) dt / \left(C_1 (T + T_{zm} K_c) \right), \quad (2)$$

де T – стійкість різального інструмента, хв;

v – швидкість різання, м/хв;

s – подача, мм/хв;

t – глибина різання, мм;

τ – поточний час, хв;

B – собівартість однієї верстато-хвилини, грн;

D – діаметр заготовки, мм;

h_n – припуск на обробку, мм;

$T_{зм}$ – час на заміну та підналадку інструмента, хв;

I – сума витрат за період стійкості, зв'язаних з експлуатацією інструмента, грн;

K_c – коефіцієнт рівня технологічного забезпечення, який відбиває особливості багатоінструментальної групової наладки верстата з ЧПК.

Стійкість різального інструмента T визначається швидкістю його зношування v_{zn} , яка залежить від режимів різання, таких як швидкість v та подача s , а також якості виготовлення інструмента та вихідних параметрів заготовки. Швидкість зношування різального інструмента:

$$v_{zn} = \frac{dh}{d\tau} = F(v, s, t, C_v), \quad (3)$$

де h – поточне зношування інструмента, мкм;

C_v – коефіцієнт, який залежить від умов обробки.

При цьому T визначається граничними умовами $h(0) = 0$ та $h(T) = h_0$, де h_0 – допустиме зношування інструмента.

Динаміку процесу зношування описують диференціальним рівнянням. Серед усіх допустимих значень, які переводять об'єкт зі становища $h_0 = 0$ у становище $h(T) = h_0$, необхідно знайти таке, при якому права частина цільових функціоналів (1) та (2) приймає екстремальне значення. Таким чином, задачею оптимізації режимів різання є вибір та підтримка на протязі обробки параметрів режимів різання, які доставляють мінімум функціонала (1) або максимум функціонала (2), за умови забезпечення основних технологічних обмежень.

Процес токарної обробки відбувається або при превалюючому впливі на нього зміни глибини різання, що характерно при чорновій обробці заготовок, які мають значну дисперсію розмірів, або при превалюючому впливі зміни зношування інструмента, що характерно при експлуатації верстатів з ЧПК в умовах ГВС, коли виконанням організаційних заходів забезпечується незначна зміна припуску і властивостей оброблюваного матеріалу.

В умовах переважаючого впливу зміни глибини різання на процес обробки впливом зміни зношування різального інструмента на силу різання нехтують. Ефективність різання оцінюють по собівартості C і продуктивності Π обробки:

$$C = ET + \frac{\mathcal{E}}{vstT}; \quad (4)$$

$$\Pi = \frac{vstT}{C_1(T + T_{cm}K_c)}. \quad (5)$$

Період стійкості інструмента T , що входить в вирази (4) і (5), є функцією режимів різання. Для інженерних розрахунків він визначається за емпіричною залежністю:

$$T = m \sqrt{\frac{C_v}{vt^{x_v} s^{y_v}}}, \quad (6)$$

де m , x_v , y_v – показники степені.

Для розчленування впливу різних факторів коефіцієнт C_v розглядають як добуток декількох коефіцієнтів:

$$C_v = K_1 K_2 K_3 K_4.$$

Оптимальне значення швидкості різання і подачі, при яких собівартість обробки буде мати мінімальне, а продуктивність максимальне значення, визначаються виразами:

$$v_0 = \frac{C_v}{B s^{y_v} t^{x_v}};$$

$$s_0 = \frac{\frac{1}{v} C^{y_v}}{B_1 v^{y_v} t^{x_v}}, \tag{7}$$

де $B = \left(\frac{1}{m} - 1\right)^m \left(T_{cm} + \frac{I}{B}\right)^m K_c^m$; $B_1 = \left(\frac{y_v}{m} - 1\right)^{y_v} \left(T_{cm} + \frac{I}{B}\right)^{\frac{m}{y_v}} K_c^{\frac{m}{y_v}}$ – для визначення собівартості обробки;

$B = \left(\frac{1}{m} - 1\right)^m T_{cm}^m K_c^m$; $B_1 = \left[\left(\frac{y_v}{m} - 1\right) T_{cm} K_c\right]^{\frac{m}{y_v}}$ – для визначення продуктивності обладнання.

Графічно цільові функції (1) і (2) інтерпретуються у тривимірному просторі поверхнями, які являють собою об'ємну модель залежності собівартості (рис. 1, а) та продуктивності (рис. 1, б) від параметрів режиму різання v і s .

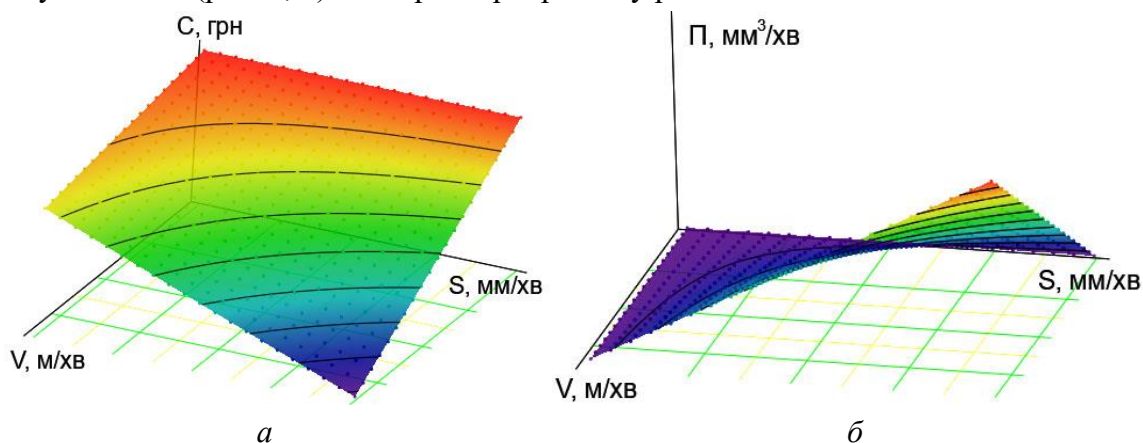


Рис. 1. Графіки залежностей собівартості (а) та продуктивності (б) від швидкості різання v і подачі s

Джерело: розроблено авторами.

Рішення задачі оптимізації можна представити системою рівнянь:

$$s = s_{доп};$$

$$t = t_{доп};$$

$$v = \frac{C_v}{\left(\frac{1}{m} - 1\right)^m \left(T_{cm} + \frac{I}{B}\right)^m K_c^m s_{доп}^{y_v} t_{доп}^{x_v}}. \tag{8}$$

Для оптимізації процесу токарну обробку необхідно вести з максимально допустимими глибиною різання і подачею, а швидкість різання вибирати відповідно до системи рівнянь (8).

Основні обмеження на режими різання накладаються необхідною точністю розмірів, заданою шорсткістю обробленої поверхні, енергетичними можливостями приводів верстата, областю стійкості пружної системи.

Спільне рішення рівнянь, що описують обмеження на параметри режиму різання, дозволяє отримати залежності $v = f(s)$ і $v = f(t)$, що визначають умови оптимізації за обраним показником оптимальності.

На рис. 2 представлена область управління в площинах v, s і v, t , що характеризує режим токарної обробки на верстаті з ЧПК, і системою оптимального управління, що забезпечує виконання отриманих умов оптимізації режиму. Криві $a-b-d-e-f-g-k-l$ і, відповідно, $a'-b'-d'-e'-f'-g'-k'-l'$ являють собою геометричне місце розташування оптимальних параметрів режиму різання при випадковому характері зміни глибини різання. Криві 1, 1', 2, 3, 3', 4, 4', 5, 5', 6 і прямі 2', 7, 7', 8, 9, 10 обмежують область оптимальних режимів різання.

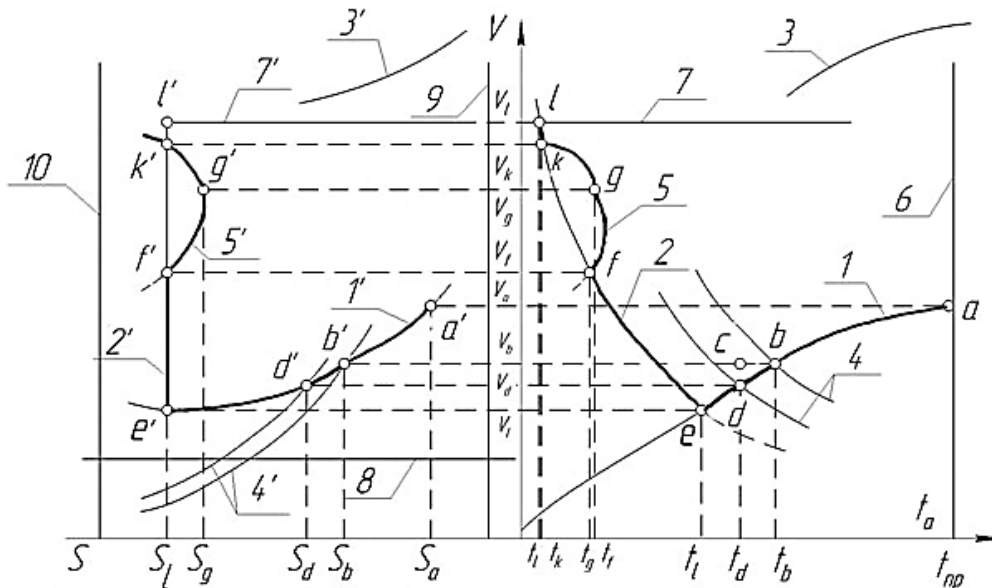


Рис. 2. Область оптимізації режимів токарної обробки

Джерело: розроблено авторами.

На основі отриманих областей оптимізації розробляють алгоритми розрахунку й оптимального управління параметрами режимів різання. У зв'язку з різними умовами обробки при чорновому й чистовому точінні доцільна розробка двох алгоритмів розрахунку режимів різання.

Обмеженнями при побудові алгоритму чорнкової обробки є максимальна по міцності різальної частини інструмента складова сили різання, максимальна по жорсткості оброблюваної заготовки складова сили різання, гранична по стійкості пружної системи верстата глибина різання, максимальні по енергетичних можливостях приводів верстата швидкість різання і подача, максимальна по потужності швидкість різання. У базу даних системи автоматизованого програмування токарної обробки включають характеристики матеріалу й геометрію різальної частини інструмента, динамічні характеристики пружної системи, розміри заготовки і властивості її матеріалу, способи закріплення заготовки, відомості про верстат, систему ЧПК, техніко-економічні вимоги.

Алгоритм розрахунку режимів різання при чистовій обробці використовують в тому випадку, коли обробку виконують за один робочий хід, або на останньому проході при багатопрохідній обробці. При цьому основним є обмеження по точності. У базу даних системи автоматизованого програмування, крім перерахованих для чорнкової обробки вихідних величин, включають діапазони хвилинних подач, на яких проявляються

динамічні властивості приводу подачі, а також величини, що характеризують шорсткість поверхні оброблених деталей і граничні за енергетичними можливостями приводів значення подачі і швидкості різання.

Для визначення кількісних співвідношень між параметрами режимів різання і побудови областей оптимізації при різних поєднаннях оброблюваного матеріалу й різального інструмента алгоритми розрахунку оптимальних режимів різання реалізують при розробці групових технологічних процесів обробки комплексних деталей.

На рис. 3 наведені отримані розрахунковим шляхом області оптимальних режимів різання, відповідно, при обробці сталі марки 45 різцем Т5К10 (криві 1 і 1'), сталі марки 30ХГСА різцем Т15К6 (криві 2 і 2') і сталі марки Х18Н9Т різцем ВК8 (криві 3 і 3').

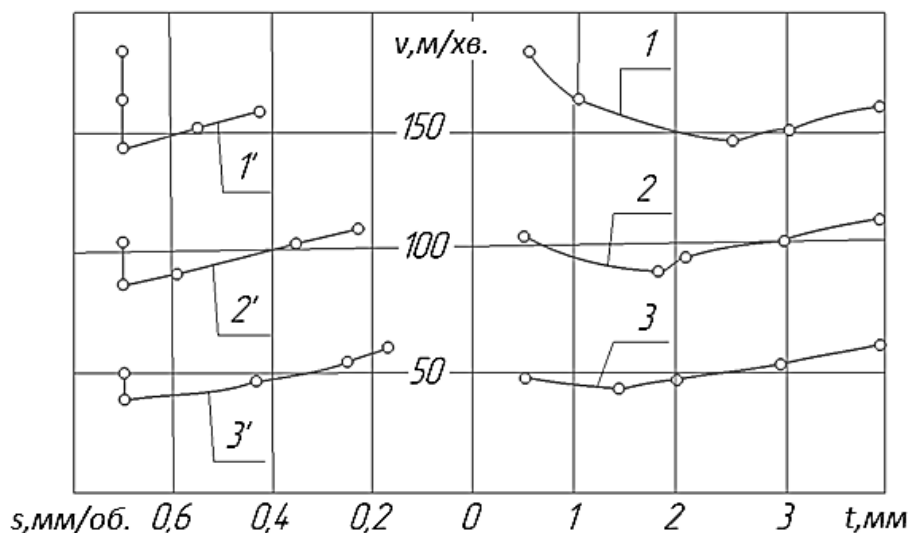


Рис. 3. Область оптимальних режимів різання:

1 – сталь 45; 2 – сталь 30ХГСА; 3 – сталь Х18Н9Т

Джерело: розроблено авторами.

Алгоритми розрахунку входять як функціональні модулі в технологічну частину процесора системи автоматизованого програмування токарної обробки комплексних деталей.

При побудові алгоритмів оптимального управління процесом токарної обробки як стабілізуючий параметр приймають радіальну складову силу різання P_y .

У випадку, якщо область зміни збурюючих факторів обмежується інтервалом $t_{пр} - t_d$ (див. рис. 2), що характерно для чорнової обробки, метою управління є стабілізація сили різання P_y , шляхом зміни подачі s і обчислення в кожній точці оптимальної швидкості різання.

Якщо зміна величини t визначається інтервалом $t_{пр} - t_l$, що має місце при чистовій обробці, алгоритм управління роботою пристрою ускладнюється через необхідність обліку областей, де можливе відхилення від заданої шорсткості обробленої поверхні.

Як датчик зворотного зв'язку використовують динамометричні пристрої, виконані у вигляді змінного різцевого блоку або різцевої вставки.

В умовах превалюючого впливу зношування інструмента на процес обробки при різанні зі змінними параметрами режиму з урахуванням силових обмежень значення показника оптимальності (технологічної собівартості обробки) представляють у вигляді функції:

$$C = \int_0^{h_0} \frac{\left[\frac{EC_p^{\alpha_2/y_p}}{C_v v^{\alpha_1} (P_g - K_{II} h)^{\alpha_2/y_p} + \frac{\mathcal{E}}{h_0}} \right] dh}{\int_0^{k_0} \frac{C_p^{(\alpha_2-1)/y_p} dh}{C_v v^{\alpha_1-1} (P_g - K_{II} h)^{(\alpha_2-1)/y_p}}}. \quad (9)$$

де P_g – максимально допустима сила різання;

C_p – коефіцієнт, що залежить від умов обробки;

K_{II} – коефіцієнт, що визначає крутизну нахилу прямих залежно від сили різання і зношування інструмента по задній грані;

α_1, α_2, y_p – показники ступеня.

Задача оптимального управління сформульована як задача досягнення мінімуму функціонала (9), представленого в загальному вигляді таким виразом:

$$I = \int_0^{x_0} F \left(x, y, \int_0^{x_0} \Phi(x, y) dx \right) dx. \quad (10)$$

Методом варіаційного обчислення знаходять необхідну умову його екстремуму:

$$F_y + \Phi_y \int_0^{x_0} F_s dx = 0. \quad (11)$$

Застосування умови (11) до виразу (9) дозволяє визначити функцію $v(h)$, що забезпечує мінімальну собівартість обробки за весь період стійкості різального інструмента:

$$v = \frac{A^{\frac{1}{\alpha_1}}}{(P_g - K_{II} h)^{\frac{1}{y_p}}}, \quad (12)$$

де $A = \frac{EC_p^{\alpha_2/y_p} [P_g^\gamma - (P_g - K_{II} h_0)^\gamma]}{(\alpha_1 - 1) \mathcal{E} C_v K_{II}^\gamma}$; $\gamma = \frac{\alpha_1 - \alpha_2 + y_p}{y_p}$.

Для доведення достатності умови (11) для мінімуму функціонала (10) використовують метод, заснований на вивченні знаку другої варіації. Доведено, що умова Лежандра гарантує збереження знаку другої варіації функціонала (9), отже, є достатньою умовою для його мінімуму.

При отриманні додаткової умови, достатньої разом з умовою Лежандра для сильного мінімуму виразу (10), використовують функцію Веєрштрасса:

$$E \left(x, y, \int_0^{x_0} \Phi(x, y) dx, p \right) = \left[p - \int_0^{h_0} \frac{C_p^{y_p} dh}{C_v v^{\alpha_1-1} (p_g - K_{II} h)^{\frac{\alpha_2-1}{y_p}}} \right]^2 > 0. \quad (13)$$

Як видно з цього виразу, функція Веєрштрасса позитивна при будь-якому p .

Реалізацію отриманих умов екстремуму показника оптимальності для токарної обробки здійснюють таким чином.

Визначають хвилинну подачу інструмента:

$$s_{xg} = ns = \frac{1}{\pi D} \left\{ \frac{E \left[P_g^\gamma - (P_g - K_{II} h_0)^\gamma \right]}{(\alpha_1 - 1) \mathcal{E} C_v \nu K_{II} \gamma C_p^{(\alpha_2 - 1)/y_p}} \right\}^{1/\alpha_1}, \quad (14)$$

де n – частота обертання заготовки.

Хвилинну подачу в процесі обробки залишають незмінною, а силу різання, зміна якої зумовлена зношуванням інструмента, стабілізують, змінюючи частоту обертання заготовки. У таких випадках вже на стадії попереднього визначення режимів різання враховують умову забезпечення екстремуму показника оптимальності.

Система управління, що реалізує цей спосіб управління обробкою, забезпечує підтримку максимально допустимої сили різання і мінімуму технологічної собівартості або максимуму продуктивності обладнання одним контуром управління, що здійснює регулювання частоти обертання заготовки.

Висновки. На основі дослідження токарної обробки на верстатах із ЧПК показані шляхи оптимізації режимів різання на взаємопов'язаному обладнанні ГВС. Доведено, що шляхом стабілізації деяких параметрів процесу обробки оптимізуються режими різання, що забезпечує стабільну роботу обладнання ГВС протягом тривалого часу, за рахунок чого підвищуються економічні показники гнучкого виробництва. Приведена методика розрахунку та оптимізації режимів різання, яка дозволяє побудувати алгоритми програмного керування верстатами з ЧПК у складі ГВС.

Список використаних джерел

1. Ямпольский Л. С. Оптимизация управления процессами металлообработки резанием / Л. С. Ямпольский, Е. С. Пуховский, М. Н. Полищук // Адаптивные системы автоматического управления: міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2008. – № 12(32). – С. 152–159.
2. Гибкие производственные комплексы Японии / пер. с япон. А. Л. Семенова; под. ред. Ю. Л. Лищинского. – М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.
3. Tolio T. Design of flexible production systems: methodology and tools / T. Tolio. – Berlin: Springer, 2009. – 310 p. – DOI: 10.1007/978-3-540-85414-2.
4. Manescu N. Flexibility and efficiency analysis of a flexible manufacturing system / N. Manescu, A. Nedelcu, Romania // Review of the Air Force Academy. – 2015. – № 1 (28).
5. Пуховський Є. С. Проектування технологічних процесів в умовах гнучкого автоматизованого виробництва / Є. С. Пуховський / Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування: збірник наукових праць. – 2010. – № 59. – С. 267–270.
6. Управління точністю обробки в гнучких виробничих системах / Є. С. Пуховський, В. К. Фролов, В. П. Приходько, Ю. М. Бецко / Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – 2022. – № 2(48). – С. 56–60.
7. Flexible versus efficiency? A case study of modern changeover in the Toyota Production System / P. Adler, B. Goldoftas, D. Levine // Organisation Science. – June, 1999. – Vol. 10, № 1. – Pp. 43-68.
8. Flexible Manufacturing System Simulation and Optimization / Monka P.P., Monkova K., Jahnátek A., Vanca J. // Experimental and Computational Investigations in Engineering. CNNTech 2020. Lecture Notes in Networks and Systems / Mitrovic, N., Mladenovic, G., Mitrovic, A. (eds). – 2021. – Vol 153. – Springer, Cham. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58362-0_4.
9. Пуховський Є. С. Проектування верстатних систем гнучкого виробництва / Є. С. Пуховський. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 226 с.
10. Matta A. Design of advanced manufacturing systems / Matta A., Samerato Q. – Springer, The Netherlands, 2005.
11. Shivanand H. Flexible manufacturing system / Shivanand H., Benal M., Koti V. – Banglador: New Age International Publishers, 2006.
12. Кибальченко А. В. Оптимизация режимов резания в условиях гибкого производства / А. В. Кибальченко, С. П. Бабак, Г. А. Жигарев. – М.: Машиностроитель, 1989. – Вып. 4. – С. 21-25.

13. Manufacturing Systems – Theory and Practice / By G. Chryssolouris. – 2nd edition. – New York, NY: Springer Verlag, 2005. – 233 p.

14. Rezail K. Mathematical Model for optimal and phased implementation of flexible manufacturing systems / Rezail K., Ostadi B. A. // Applied Mathematics and Computation. – 2007. – Vol. 184(2). – Pp. 729-736.

15. Optimization of cutting conditions for single pass turning operations using a deterministic approach / J. Wang, T. Kuriyagawa, X.P. Wei, D. M. Guo // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2002. – Vol. 42/9. – Pp. 1023-1033.

References

1. Yampolskyi, L.S., Pukhovskiy, E.S., Polyshchuk, M.N. (2008). Optymyzatsiya upravleniya protsesamy metalloobrobokoy rezanyem [Optimization of control of metalworking processes by cutting]. *Adaptivni systemy avtomatyzovano upravlinnia: mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk – Adaptive systems of automatic control: interdepartmental scientific and technical collection*, (12(32)), 152–159.

2. Lyshtynskiy, Yu.L. (1987). *Gybkye proyzvodstvennye komplekxy Yaponii [Flexible production complexes of Japan]*. Maschynostroenye.

3. Tolio, T. (2009). *Design of flexible production systems: methodology and tools*. Springer. doi:10.1007/978-3-540-85414-2.

4. Manescu, N., Nedelcu, A., Romania. (2015). Flexibility and efficiency analysis of a flexible manufacturing system. *Rewiew of the Air Forse Academy*, 1(28).

5. Pukhovskiy, E.S. (2010). Proektuvannia tekhnolohichnykh protsesiv v umovakh hnuchkoho avtomatyzovano vyrobnytstva [Designing technological processes in the conditions of flexible automated production]. *Visnyk NTUU «KPI». Mashynobuduvannia – Bulletin of NTUU "KPI". Mechanical engineering*, (59), 267–270.

6. Pukhovskiy, Ye.S., Frolov, V.K., Prykhodko, V.P., Betsko, Yu.M. (2022). Upravlinnia tochnistiu obrobky v hnuchkykh vyrobnychykh systemakh [Processing precision management in flexible production systems]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Serii «Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv» – Bulletin of the Sumy National Agrarian University. "Mechanization and automation of production processes" series*, (2(48)), 56–60.

7. Adler, P., Goldoftas, B., Levine, D. (June 1999). Flexible versus efficiency? A case study of modern changeover in the Toyota Production System. *Organisation Science*, 10(1).

8. Monka, P.P., Monkova, K., Jahnátek, A., Vanca, J. (2021). Flexible Manufacturing System Simulation and Optimization. In Mitrovic, N., Mladenovic, G., Mitrovic, A. (Eds.), *Experimental and Computational Investigations in Engineering. CNNTech 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*, 153. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58362-0_4.

9. Pukhovskiy, E.S. (2021). *Proectyvannia verstatnykh system gnutchkoho vyrobnytstva [Design of machine tool systems of flexible production]*. KPI im. Igoria Sykorskogo.

10. Matta, A., Samerato, Q. (2005). *Design of advanced manufacturing systems*. Springer, The Netherlands.

11. Shivanand, H., Benal M., Koti, V. (2006). *Flexible manufacturing system*. New Age International Publishers.

12. Kybaltchenko, A.V., Babak, S.P., Gygarev, G.A. (1989). Optimizatsiia rezhimov rezaniia v usloviakh gibkogo proyzvodstva [Optimization of cutting conditions in flexible production]. *Maschynostroitel*, 4, 21-25.

13. Chryssolouris, G. (Ed.). (2005). *Manufacturing Systems – Theory and Practice*. 2nd ed. NY: Springer Verlag.

14. Rezail, K., Ostadi, B. (2007). A Mathematical Model for optimal and phased implementation of flexible manufacturing systems. *Applied Mathematics and Computation*, 184(2), 729-736.

15. Wang, J., Kuriyagawa, T., Wei, X.P., Guo, D.M. (2002). Optimization of cutting conditions for single pass turning operations using a deterministic approach. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42/9, 1023-1033.

Отримано 19.12.2022

Evgen Pukhovskiy¹, Volodymyr Frolov², Serhii Sapon³, Iurii Betsko⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: puhovskije50@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0001-7843-0922>. **Researcher ID:** [HDN-2044-2022](https://orcid.org/0000-0001-7843-0922)

²PhD in Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: v.k.frolov@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-3697-286x>. **Researcher ID:** [ACH-0071-2022](https://orcid.org/0000-0002-3697-286x)

³PhD in Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Wood Technology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: s.sapon@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>. **Researcher ID:** [G-7764-2014](https://orcid.org/0000-0003-1082-6431)

⁴Senior Lecturer of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: betsko.uri@gmail.com **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7283-2207> **Researcher ID:** [ABT-9861-2022](https://orcid.org/0000-0002-7283-2207)

OPTIMIZATION OF CUTTING MODES ON MACHINES OF FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS

The main problem of manufacturing products in conditions of flexible automated production is the achievement of high quality indicators of parts, such as accuracy characteristics, surface roughness and surface layer condition. Obtaining of high quality parts in modern technological systems requires the study of specific features of flexible production. Frequent readjustment of equipment, replacement of tools, redistribution of characteristics of the elastic system of machine tools, the production of parts from materials of different workability determine the variable nature of the accuracy parameters of products manufactured in flexible manufacturing systems (FMS). In addition, the difficulties associated with the full automation of the technological process are added: automatic basing and fixing of workpieces and tools, transfer and reorientation of parts for processing on various machine modules, accumulation of errors when basing blanks on satellites, branching of dimensional connections of multipurpose machines, inaccuracies of automatic adjustment and positioning of the tool, the need for active control of the treated surface and the condition of the cutting tools, providing feedback between real and specified accuracy, automatic maintenance of thermal characteristics of machine equipment, ensuring optimal cutting modes for all FMS machines. The solution of most of these problems is achieved through adaptive management of the processes in order to obtain specified indicators of processing quality. Designing the optimal technological process under changing conditions of flexible production is a very difficult task, due to the multivariate technology of processing parts included in the group. Meanwhile, in the theory of group production there are methods to optimize the process of choosing the right technological solution. With the optimization of group technologies, it is necessary to be able to specialize in real production. On the first stage on the basis of advanced technological processes, it is necessary to create a type for the development of technological processes. The cost of developing such processes is insignificant, so that the technology is widely implemented. In the process of developing group technological processes of machining complex parts or a complex combination of surface elements of a part in order to ensure the efficiency of the process, it is necessary to solve the problem of optimizing machining parameters in accordance with accepted optimality criteria and taking into account the main technical limitations. At the same time, it is considered as the optimization of constantly set, for a specific instrumental group adjustment, processing modes using the methods of mathematical modeling and automated information processing, and continuous optimization with the help of control systems for technological equipment, which are part of the FMS. Therefore, the problem of calculating and optimizing cutting modes on interconnected FMS machines is extremely urgent. At the same time, not the most intense modes are considered optimal, but just those that ensure the stable operation of the FMS for a long time.

Keywords: optimization; flexible manufacturing system; cost price; mode of cutting; accuracy of the processing.

Fig.: 3. References: 15.