УДК 681.31:621.941.236

В.Ю. Денисюк, к.т.н., доцент
Луцький національний технічний університет

КРИТЕРІЇ ЯКОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ НА БАГАТОШПИНДЕЛЬНИХ ТОКАРНИХ АВТОМАТАХ

В статті розглянуто комплексний підхід до моделювання зв'язків технологічних факторів з критеріями якості формоутворюючих поверхонь і методика оптимізації багатоінструментальної токарної операції.

Виробничий досвід провідних промислових підприємств засвідчує доцільність використання багатошпиндельних токарних автоматів для токарної обробки деталей. В порівнянні з одношпиндельними токарними автоматами, верстатами з ЧПК, багатошпиндельні токарні автомати характеризуються в декілька разів більшою цикловою та технологічною продуктивністю, хоча ефективне їх використання в умовах багатономенклатурного виробництва стримується відсутністю відпрацьованих систем технологічної підготовки токарно-автоматних операцій і організаційно-технологічних методик оптимізації операцій та інструментальних налагоджень з метою зниження собівартості та оброблення, досягнення підвищених параметрів якості оброблюваних деталей в умовах переналагоджувального виробництва.

Багатоінструментальні верстати за конструктивним розміщенням інструменту і характером технологічних операцій, які на них проводяться оснащені декількома інструментами, можуть мати різні системи керування, але для них характерна наявність суміщених робочих ходів, тобто паралельної (одночасної) обробки багатьох інструментів. Ці верстати знайшли широке застосування в серійному і масовому виробництвах і є одним із основних компонентів при створенні поточних і автоматичних ліній.

Багатоінструментальний багатошпиндельний токарний автомат 1Б265П-6К (рис. 1) представляє трьохкаскадну систему: позиція – супорт – інструмент. Позиціям присвоїли номери 1, 2, …, k, …, R (R – число позицій), супортам номери 1, 2, …, i_k, …, I_k (I_k – число супортів на k-ій позиції), а інструментам – номера 1, 2, …, j_{ki}, …, J_{ki} (J_{ki} – число інструментів на i-му супорті k-ї позиції). Відповідну індексацію мають величини, які приймають участь у розрахунку. Наприклад, n_k – частота обертання шпинделя на k-ій позиції, s_{ki} – подача i-го супорта k-ї позиції, r_{kij} – радіус при вершині j-го різця, розміщеного на i-му супорті k-ї позиції.

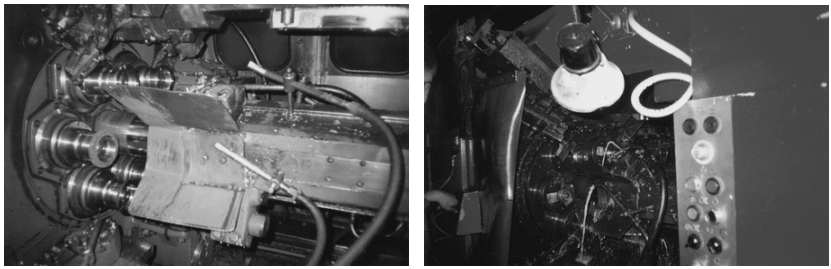

Рис. 1. Загальний вигляд робочого простору токарного автомата 1Б265П-6К

Розробку математичної моделі почнемо із складання виразів для критеріїв оптимальності. Найбільш розповсюдженими критеріями для багатоінструментної обробки є собівартість і продуктивність операції [1]. Тому, потрібно прагнути до мінімізації собівартості і максимізації продуктивності, яка зазвичай вимірюється в штуках за одиницю часу.

Для того, щоб в обох випадках забезпечити мінімізацію критерію, замість числа штук за одиницю часу візьмемо "представником" продуктивності час виготовлення однієї деталі – штучний час.

Для визначення часу обробки деталі на окремій операції, тобто штучного часу, треба враховувати машинний час $t_м$ і допоміжний $t_{доп}$, частину часу на технічне і організаційне обслуговування $t_{обсл}$, на відпочинок $t_{відп}$ і на заміну інструменту

$t_{зам}$, які припадають на одну деталь. Величини $t_м$ і $t_{зам}$ залежать від режиму обробки, а $t_{доп}$, $t_{відп}$, $t_{обсл}$ від нього не залежать. Вони є змінними для оптимізації, і їх можна не враховувати. В зв'язку з цим зміна складова штучного часу:

$$Q_2 = T_{шт} = t_м + t_{зам}. \quad (1)$$

Машинним (основним) є час роботи інструмента на робочій подачі, включаючи час на відведення, підведення та врізання інструмента і відповідно зняття стружки. Пройдений при цьому шлях l_{kij} назвемо довжиною робочого ходу інструмента. Якщо інструменти розміщені на одному супорті, то довжина робочого ходу супорта l_{ki} дорівнює максимальній довжині робочого ходу інструментів супорта l_{kijmax}. Машинний час ізольовано розглянутого інструмента:

$$t_{мkij} = l_{kij} / n_{ki} s_{ki}. \quad (2)$$

Машинний час роботи верстата $t_м$ дорівнює максимальному $t_{мkij}$. Присвоїмо інструменту з максимальним машинним часом індекс $\bar{j}$, а супорту і позиції, на яких він знаходиться, індекси $\bar{i}$ і $\bar{k}$. Тоді:

$$t_м = t_{м\bar{k}\bar{i}\bar{j}} = l_{\bar{k}\bar{i}\bar{j}} / n_{\bar{k}\bar{i}} s_{\bar{k}\bar{i}}. \quad (3)$$

Щоб визначити частину часу $t_{зам}$, який припадає на одну деталь, потрібно розділити $t_{зам}$ на число деталей, які виготовлені за час від встановлення інструмента до його заміни в зв'язку з затупленням. Позначимо цей час через $T_{hд}$. Індекс h вказує на зв'язок цього часу зі спрацюванням інструмента. Відношення часу різання окремого інструмента до загального машинного часу назвемо коефіцієнтом часу різання λ_{kij}. Час роботи інструмента до його заміни, який виміряний у хвилинах машинної роботи верстата – $T_{hм}$, більший за час роботи того ж інструмента T_h:

$$T_{hdkij} = T_{hkij} / \lambda_{kij} t_{мkij} = T_{hMkij} / t_{мkij}. \quad (4)$$

Змінну складову штучного часу, якщо інструменти заміняють окремо в міру їх виходу з ладу, визначаємо як суму машинного часу та часу на заміну і регулювання інструмента, віднесеного до однієї деталі:

$$Q_2 = t_{м\bar{k}\bar{i}\bar{j}} + \sum_{k=1}^{k=R}\sum_{i=1}^{i=I}\sum_{j=1}^{j=J} t_{замkij} / T_{hdkij} . \qquad (5)$$

Перейдемо до змінної частини собівартості виготовлення деталі Q_1. Для визначення собівартості розраховуємо витрати на інструмент t_u:

$$t_{ukij} = E_н t_{зам.kij} + \omega_{kij} , \qquad (6)$$

де $E_н$ – заробітна плата за хвилину роботи налагоджувальника, який проводить заміну інструмента;

ω_{kij} – затрати на переточування і спрацювання *kij*-го інструмента, які віднесені до часу роботи інструмента.

Для визначення собівартості слід помножити штучний час на собівартість верстато-хвилини E' і додати до цього добутку частку витрат на інструмент, віднесених до однієї деталі. Визначаємо Q_1 так:

$$Q_1 = E'Q_2 + t_{ukij} = t_{м\bar{k}\bar{i}\bar{j}} + \sum_k\sum_i\sum_j \frac{t_{зам.kij}\left(E' + E_н\right) + \omega_{kij}}{T_{hdkij}} . \qquad (7)$$

Вираз під знаком $\sum_k\sum_i\sum_j$ в (7) означає витрати на інструмент. Вирази для Q_1 і Q_2 структурно однакові, і в чисельник виразу під знаком суми в загальних випадках входять величини, які не залежать від режиму обробки. В зв'язку з цим, в подальшому поряд з формулами (5) і (7) користувались узагальненим виразом для критерію собівартості операції

$$Q = E_з t_{м\bar{k}\bar{i}\bar{j}} + \sum_k\sum_i\sum_j B_{kij} / T_{hdkij} , \qquad (8)$$

де $E_з$ і B_{kij} дорівнює відповідно E' і $t_{зам.kij}\left(E' + E_н\right) + \omega_{kij}$ та одиниці і $t_{зам.kij}$ в підрахунку собівартості й штучного часу.

Дослідження поведінки функції Q здійснюємо при нелінійних обмеженнях. Їх можна розділити за числом інструментів, які потрібно враховувати в процесі дослідження поведінки функції, на два типи. Розгляд стійкості інструментів багатоінструментальної операції зводиться до розгляду стійкості інструмента. Тому під час вивчення поведінки Q при обмеженні за стійкістю можна обмежитися одним інструментом,

припускаючи, звичайно, що він може бути кожним із інструментів, які застосовуються для багатоінструментальної обробки. Аналогічно досліджується і обмеження за шорсткістю поверхні, тому що нас цікавить кожна окремо оброблена поверхня і відповідний інструмент.

При обмеженнях за силами різання, потужністю і продуктивністю необхідно враховувати сумарний ефект від дії всіх інструментів. Рівняння границь у загальному вигляді $\varphi = \varphi(n,s)$. Під φ розуміється будь-яке з вище перерахованих обмежень (для обмежень за стійкістю і шорсткістю поверхні враховують частоту обертання і подачу). Виникає задача знаходження екстремуму функції Q за умови, що на змінні накладено ще зв'язок φ. Для розв'язання цієї задачі треба перевірити чи виконуються необхідні умови існування екстремуму.

У деяких випадках вдається знайти розв'язок рівняння в явній формі щодо одного з перемінних. Підставляючи його значення у вираз функції Q, можна далі провести дослідження, використовуючи звичайні необхідні умови існування екстремуму. Якщо цей прийом не вдається, то можна застосувати метод невизначених множників Лагранжа. Пояснимо ідею методу графічно на прикладі функції $Q = Q(n,s)$ і обмеження $\varphi = \varphi(n,s)$.

На рис. 2 на площині n, s нанесені лінії однакового рівня функції Q, тобто лінії $Q=const$ і обмеження φ. На кожній лінії рівня функції Q проставлене її значення собівартості. Рухаючись уздовж кривої $\varphi = \varphi(n,s)$, перетинаємо криві $Q=const$, при цьому відбувається зміна константи. Так, під час руху уздовж границі φ зверху вниз значення константи спочатку зменшується, а потім збільшується. Там, де відбувається зміна знаку приросту константи, досягається екстремальне значення, у нашому випадку мінімум. Це має місце при торканні кривої $\varphi(n,s) = C$ і однієї з кривих $Q(n,s)=const$ для $Q=c_4$. Оскільки криві $Q=const$ і $\varphi=C$ мають загальну дотичну, то в точці дотику, тобто в точці з координатами $n_\varphi^{(0)}$ і $s_\varphi^{(0)}$, має місце пропорція

$$\frac{dQ/dn}{dQ/ds} = \frac{d\varphi/dn}{d\varphi/ds} \tag{9}$$

чи, якщо ввести множник пропорційності λ,

$$dQ/dn + \lambda\, d\varphi/dn = 0,$$

$$dQ/ds + \lambda\, d\varphi/ds = 0. \tag{10}$$

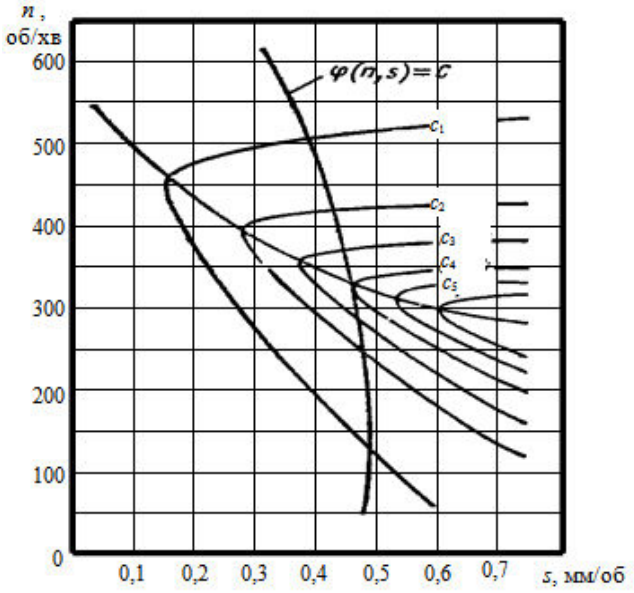

Рис. 2. Лінії однакового рівня функції

Рівняння (10) і $\varphi(n,s) = C$ утворюють систему трьох рівнянь з трьома невідомими $\left(\lambda,\ n_{\varphi}^{(0)},\ s_{\varphi}^{(0)}\right)$, тобто з них можуть бути визначені значення $n_{\varphi}^{(0)}$ і $s_{\varphi}^{(0)}$. Множник λ (множник Лагранжа) при цьому відіграє допоміжну роль. Для вирішення питання про наявність екстремуму функції Q на обмеженні φ утворюємо функцію $F = Q + \lambda\varphi$ і аналізуємо необхідні умови, які мають вигляд рівняння (10). Функція F називається функцією

Лагранжа. Проведемо дослідження поводження Q на конкретних границях.

Обмеження за шорсткістю поверхні сформулюємо з урахуванням впливу мікронерівностей поверхні на спрацювання інструмента:

$$Rz_{kij}\left(hC_h\right)^z \le Rz_{0kij}, \tag{11}$$

де Rz_{kij} – висота гребінців, яка розрахована без врахування спрацьовування; z – показник ступеня впливу спрацювання на шорсткість; $C_h = 1/h_н$; h і $h_н$ – біжуче і початкове спрацювання інструмента; Rz_{0kij} – висота гребінців, яка допускається за кресленням.

Залежно від швидкості різання Rz визначаємо за різними формулами. Значення частоти обертання, що відповідає граничній швидкості різання $v_{гр}$ і яке визначає область дії формул, обчислюється так:

$$n = 1000/\pi D\left(193 - 243\,s/r_в^{0,52}\right), \tag{12}$$

якщо $v < v_{гр}$, то

$$Rz = sh^z C_h^z\left(98 - 0{,}5v\right)/r_в^{0,53}\Delta\varphi_1^{0,04}, \tag{13}$$

якщо $v \ge v_{гр}$, то

$$Rz = \left(r_в - \sqrt{\left(4r_в^2 - s^2\right)/2}\right)h^z C_h^z, \tag{14}$$

де $r_в$ – радіус заокруглення вершини різця; а

$$\Delta\varphi_1 = \begin{cases} \varphi_1 - \arcsin s/2r_в, & якщо\ s < 2r_в \sin\varphi. \\ 1, & якщо\ s \ge 2r_в \sin\varphi. \end{cases} \tag{15}$$

Границя області, допустимої за шорсткістю в просторі змінних n, s і h, складається з поділяючої кривої, що відповідає випадку $v = v_{гр}$ (присвоїмо їй індекс I), двох поверхонь (II і III) для $v < v_{гр}$ і кривої IV для $v \ge v_{гр}$. Замінивши в рівнянні (11)

знак нерівності на знак рівності з врахуванням (13) і (14), одержимо рівняння поверхні II:

$$R - s\left(C_1 - C_2 n\right)h^z C_h^z = 0, \tag{16}$$

де $R = Rz_0 r_в^{0,53}$, C_1=98, $C_2 = \left(0{,}5\pi D \cdot 10^{-3}\right)$;
поверхні III

$$R\left(C_3 - \arcsin s/C_4\right) - s\left(C_1 - C_2 n\right)h^z C_h^z, \tag{17}$$

де R, C_1 і C_2 – ті ж, що (16), а C_3=φ і C_4=2$r_в$;
кривої IV

$$s - 2\sqrt{2Rz_0\, r_в / h^z C_h^z - Rz_0^2 / h^{2z} C_h^{2z}} = 0. \tag{18}$$

Тоді функція Лагранжа з врахуванням обмеження за шорсткістю поверхні буде мати вигляд:

$$F_ш = \frac{E_з l}{ns} + \frac{\left(Bn^\mu x^{\nu\mu} + A^\mu\right)\left(h_м - h_н\right)}{nsT_n A^\mu \left(h - h_н\right)} + \lambda\left[R - s\left(C_1 - C_2 n\right)h^z C_h^z\right] \tag{19}$$

$h_м$ – час роботи інструмента до досягнення спрацювання; $h_н$ – період нормального спрацювання інструмента; μ – показник, який характеризує ступінь впливу швидкості різання на стійкість; λ – коефіцієнт часу різання; A – коефіцієнт, який враховує умови обробки.

Необхідні умови існування екстремуму:

$$\begin{aligned}\frac{\partial F_ш}{\partial n} = &-\frac{E_з l}{n^2 s} + \frac{B\mu n^{\mu-1} x^{\nu\mu}\left(h_м - h_н\right)nsT_n A^\mu\left(h - h_н\right)}{\left[nsT_n A^\mu\left(h - h_н\right)\right]^2} - \\ &- \frac{sT_n A^\mu\left(h - h_н\right)\left(Bn^\mu x^{\nu\mu} + A^\mu\right)\left(h_м - h_н\right)}{\left[nsT_n A^\mu\left(h - h_н\right)\right]^2} + \lambda C_2 s h^z C_h^z = 0;\end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial F_ш}{\partial n} = &-\frac{E_з l}{ns^2} + \frac{Bn^\mu \nu\mu x^{\nu\mu-1}\dfrac{dx}{ds}\left(h_м - h_н\right)nsT_n A^\mu\left(h - h_н\right)}{\left[nsT_n A^\mu\left(h - h_н\right)\right]^2} - \\ &- \frac{nT_n A^\mu\left(h - h_н\right)\left(Bn^\mu x^{\nu\mu} + A^\mu\right)\left(h_м - h_н\right)}{\left[nsT_n A^\mu\left(h - h_н\right)\right]^2} + \lambda\left[\left(C_1 - C_2 n\right)h^z C_h^z\right] = 0;\end{aligned} \tag{21}$$

$$\frac{\partial F_{ш}}{\partial n} = -\frac{\left(Bn^{\mu}x^{\nu\mu} + A^{\mu}\right)\left(h_{м} - h_{н}\right)}{h^{2}nsT_{n}A^{\mu}} + \lambda z h^{z-1}C_{h}^{z}\left[-s\left(C_{1} - C_{2}n\right)\right] = 0. \qquad (22)$$

Визначивши λ з (22), підставивши отримане значення в рівняння (20) і (21), розділивши вираз (20) на *s*, а (21) на *n* та зробивши перетворення, одержимо умову наявності екстремуму:

$$\frac{B\mu n^{\mu}x^{\nu\mu}T_{n}A^{\mu}\left(h - h_{н}\right)\left(h_{м} - h_{н}\right)\left(1 - \nu\dfrac{s}{x}\dfrac{dx}{ds}\right)}{\left[nsT_{n}A^{\mu}\left(h - h_{н}\right)\right]^{2}} + \\ + \frac{\left(Bn^{\mu}x^{\nu\mu} + A^{\mu}\right)\left(h_{м} - h_{н}\right)\left(1 + C_{2}\right)}{hzs^{2}nsT_{n}A^{\mu}\left(C_{1} + n - C_{2}n\right)} = 0. \qquad (23)$$

Оскільки $\left(1 - \nu\dfrac{s}{x}\dfrac{dx}{ds}\right) > 0$, а $\overline{B}$, μ, ν, n, x, T_{n}, A^{μ} додатні, то перший лівий доданок у рівнянні (23) завжди додатній, а знак другого доданка визначається знаком різниці $\left(C_{1} + n - C_{2}n\right) = \left(98 + n - 0{,}5\pi D \cdot 10^{-3}n\right)$. Добуток Dn залежить від рівня швидкостей різання і не може рости безгранично, тому що з ростом D необхідно знижувати n. За рівності швидкостей різання $\left(C_{1} + n - C_{2}n\right) > 0$, і, отже, другий доданок у рівнянні (23) завжди додатній, ця умова виконана бути не може. Таким чином, на поверхні II екстремумів немає. Дослідження наявності екстремуму на поверхні III дає аналогічний результат.

З рівняння (23) встановлено, що перший доданок завжди додатній. Знак другого доданка залежить від знака різниці, що стоїть в знаменнику у дужках. Зробивши перетворення, одержимо таку умову заперечності другого доданка: $Rz_{0} \le 2r_{в}\left(h/h_{м}\right)^{z}$. Ця умова виконується для усіх випадків обробки, і тому другий доданок у (23) від'ємний, тобто необхідна умова наявності екстремуму на границі за шорсткістю при $\nu \ge \nu_{гр}$ забезпечується. З'ясуємо, наскільки покращиться критерій Q, якщо встановити режим обробки, що відповідає точці екстремуму на лінії обмеження за шорсткістю. Будемо оцінювати його за відношенням оптимального значення критерію $Q_{опт}$ до його значення під час роботи з максимальним

спрацюванням $Q_{hм}$. Очевидно, що $Q_{hопт}/Q_{hм}<1$. Експеримент (для типових випадків обробки) показав, що на величину цього відношення найбільш впливає показник ступеня впливу спрацювання на шорсткість *z*. Для значень *z*, рівних 0,1; 0,2; 0,3, відношення $Q_{hопт}/Q_{hм}$ приймають значення 0,96; 0,9; 0,84. При цьому значення $h\text{-}h_н/h_м\text{-}h_н$, для яких досягаються оптимальні значення критерію – $Q_{hопт}$ дорівнюють приблизно 0,3; 0,22; 0,15. У зв'язку з цим пошук екстремуму Q при $v>v_{гр}$ варто здійснювати, розглядаючи Q як функцію трьох змінних (*n*, *s*, *h*) за наявності лінійних обмежень на *n*, *s*, і *h*, зв'язку між *s*, *h,* що визначаються з рівняння (18).

Співвідношення екстремальних точок функції Q при $v<v_{гр}$ і $v>v_{гр}$ є основним, оскільки різний ступінь впливу заданої шорсткості поверхні Rz_0 на значення подачі *s*. З розглянутого видно, що одне і теж Rz_0 може бути реалізовано для $v>v_{гр}$ при значно більшому значенні подачі, ніж при $v<v_{гр}$. Тому мінімум Q з врахуванням обмеження за шорсткістю досягається в області $v>v_{гр}$. Звідси випливає, що необхідно накладати додаткове обмеження на частоту обертання за шорсткістю:

$$n_ш \geq 1000/\pi D\left(193-243 s_n/r_в^{0,52}\right). \qquad (24)$$

Рівняння границі за стійкістю для одного інструмента одержуємо з виразу (11). Воно запишеться так: $T_{hм}=T_0$. Використовуючи рівняння (4) для визначення T_{hd} і підставивши його значення у вираз (8), одержимо вираз для критерію на границі за стійкістю:

$$Q_T = l/ns\left(E+B/T_0\right). \qquad (25)$$

Похідні Q_T по *n* і *s* від'ємні, тому необхідні умови наявності екстремуму не виконуються. Порівнюючи величини похідних за *n* і *s,* встановлюємо, що значення Q під час руху вздовж лінії стійкості зменшується із збільшенням *s* (незважаючи на те, що при цьому зменшується *n*), і мінімальне значення Q досягається в точці перетину обмеження за стійкістю з лінією $s=s_{max}$. Значення *n* у цій точці позначимо $n^{(T)}$.

Перейдемо до вивчення поведінки Q на обмеженнях, що залежать від усіх інструментів операції. У цьому випадку для критеріїв використовуємо обмеження за силами різання

$$P = \left(C_p s^{\omega} + C_h s^{v} h\right) n^{r} \quad \text{або} \quad P = \left(C'_p s^{\omega} + C_h s^{v} h\right) v^{r} \tag{26}$$

одержимо рівняння границі за силами різання

$$\sum_k \sum_j \left(C_{pkj} s_k^{\omega_{kj}} + C_{ukj} s_k^{v_{kj}} h_{kj} C_{hkj}\right) n_k^{r_{kj}} = P_{доп} \,. \tag{27}$$

Застосувавши метод множників Лагранжа, одержимо R умов наявності екстремуму:

$$k_1 \sum_j \left[1 - v_{kj} \frac{s}{x_{kj}} \frac{dx_{kj}}{ds_k}\right] + k_2 \sum_j \left(r_{kj} - \omega_{kj}\right) + k_3 \sum_j \left(r_{kj} - v_{kj}\right) = 0 \,, \tag{28}$$

де k_1, k_2, k_3 – додатні величини, які залежать від коефіцієнтів рівняння (27).

Найбільш важливим для практики є випадок, коли r_{kj}=0. Тоді, $n_k^{r_{kj}} = 1$, і з рівняння обмежень на сили різання:

$$P = C_p s^{y_p} t^{x_p} v^{r_p} k_p \,, \tag{29}$$

можна визначити s_k. У рівнянні (29) y_p, x_p, r_p – постійні, які характеризують ступінь впливу відповідних елементів режиму різання на сили; k_p – коефіцієнт, який враховує вплив спрацювання інструмента на силу різання; C_p – постійна за властивостями оброблюваного й інструментального матеріалів.

Обмеження за силами різання мають вигляд s_k=*const*, і вони повинні бути враховані при визначенні максимально допустимої подачі для кожного інструмента s_{kjmax}. Рівняння границі за миттєвим значенням потужності записується аналогічно до виразу (27):

$$\sum_k \sum_j \left(C_{pkj} s_k^{\omega_{kj}} + C_{ukj} s_k^{v_{kj}} h_{kj}\right) n = W_в \,, \tag{30}$$

де $W_в$ – номінальна потужність верстата.

Умова наявності екстремуму на границі за потужністю:

$$k_1 \sum_j \left[1 - v_{kj} \frac{s_k}{x_{kj}} \frac{dx_{kj}}{ds_k}\right] + k_2 \sum_j \left(1 - \omega_{kj}\right) + k_3 \sum_j \left(1 - v_{kj}\right) = 0 \,. \tag{31}$$

Наявність екстремуму на границі за потужністю залежить від знаків виразів у круглих дужках. Оскільки ω_{kj} і v_{kj} не перевищують відповідно 0,6 і 0,5, то ці вирази додатні. Отже, додатні всі члени рівняння (31), і умова наявності екстремуму на лінії потужності не виконується. Обмеження за заданою продуктивністю з урахуванням рівняння (8) і критеріїв заданої продуктивності

$$l_{\bar{k}} / n_{\bar{k}} s_{\bar{k}} + \sum_k \sum_j t_{зам.kj} / T_{hdkj} = 60/T . \qquad (32)$$

Визначивши $\sum_k \sum_j t_{зам.kj} / T_{hdkj}$ з виразу (32) і підставивши його значення в рівняння (7), одержимо вираз для критерію Q_1 на обмеженні за заданою продуктивністю:

$$Q_N = l_{\bar{k}} / n_{\bar{k}} s_{\bar{k}} \sum_k \sum_j \left(E_н + W_{kj}\right) + \sum_k \sum_j 60/N_0 \left(E_з + E_н\right) + W_{kj} . \qquad (33)$$

З рівняння (33) видно, що Q не має екстремумів на границі заданої продуктивності. На цьому закінчується вивчення поводження функції Q на обмеженнях, що враховуються в розрахунку режимів різання. Можна очікувати появу нових обмежень, які необхідно включити в розрахунок. У цьому випадку потрібне уточнення алгоритмів оптимізації режимів різання. Для цього можна рекомендувати почати ці уточнення з дослідження поведінки Q, які включаються у розрахунок обмежень. Так, обмеження, пов'язане з явищем технологічної спадковості за заданною продуктивністю має структуру, схожу на досліджене обмеження (30). Діючи аналогічним способом, що і під час виводу рівняння (31), одержимо, що наявність екстремуму на обмеженні за моделлю кінематики спрацювання залежить від знаку різниці показників степенів k_2 і k_1.

Розроблена методика моделювання зв'язків технологічних факторів з критеріями якості формоутворюючих поверхонь і методика оптимізації багатоінструментальної токарної операції та інструментального налагодження багатошпиндельних токарних автоматів дозволила на 10–20 % зменшити собівартість оброблюваних деталей з забезпеченням необхідних показників якості поверхонь, підвищити ефективність токарно-

автоматних операцій в умовах серійного багатономенклатурного виробництва.

Література

1. Автоматизированное проектирование оптимальных наладок металлорежущих станков / А.М. Гильман, Г.В. Гостев, Ю.В. Егоров, Ю.В. Ясаков. – М.: Машиностроение, 1984. – 168 с.
2. Денисюк В.Ю., Заболотний О.В., Марчук В.І. Зв'язки режимів формоутворення з параметрами мікрорельєфу поверхні під час токарної обробки // Наукові нотатки: Міжвуз. зб. (за напрямком "Інженерна механіка"). Вип. 15. – Луцьк: ЛДТУ, 2004. С. 65-74.
3. Денисюк В.Ю., Марченко В.М., Марчук В.І. Моделювання формоутворення поверхонь деталей для забезпечення характеристик якості на токарно-автоматних операціях // Наукові нотатки: Міжвуз. зб. (за напрямком "Інженерна механіка"). Вип. 18. – Луцьк: ЛДТУ, 2006.– С. 133–143.