

МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 621.9.06-529

Я.В. Васильченко, к.т.н., доц.
Донбаська державна машинобудівна академія

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ СИСТЕМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ НА ВАЖКИХ ВЕРСТАТАХ

Проаналізовано методи визначення стійкісної залежності інструменту для систем адаптивного управління процесом різання. Виявлено значущі параметри і розроблено математичні моделі для реалізації системи адаптивного оптимального управління процесом механічної обробки на важких верстатах.

Вступ. Постановка проблеми. Можливість виготовлення важких машин, конкурентоспроможних на світовому ринку, забезпечується оснащенням машинобудівних підприємств сучасним верстатним обладнанням. З розвитком промисловості посилюються вимоги до машин, підвищується точність їх виготовлення, застосовуються нові марки матеріалів, які дають можливість досягнення нового рівня експлуатаційних характеристик. Технологічні процеси автоматизованих виробництв повинні бути забезпечені обладнанням високого класу точності з високою стабільністю характеристик функціонування.

При призначенні оптимальних режимів різання необхідно враховувати безліч факторів, які пов'язані з фактичним станом заготовки, інструменту та всієї технологічної системи в цілому. Цим і визначається актуальність оптимізації режимів механічної обробки виробів важкого машинобудування з врахуванням фактичного стану процесу в режимі реального часу.

Серед факторів, що ускладнюють реалізацію алгоритму адаптивного керування процесом різання слід виділити те, що на момент призначення раціональних режимів обробки відсутня повна інформація про параметри процесу різання. Така невизначеність, іноді дуже значна, носить принциповий характер та не може бути усунена до появи інформаційних сигналів в процесі різання. Закони управління технологічною системою в процесі обробки формуються так, щоб на основі первинних параметрів, які характеризують обраний тип заготовки (матеріал, розмір, припуск та ін.) і прийнятий метод обробки (верстат, пристосування, схема різання, технологічне середовище), змінюючи параметри керування (режими різання, варіант й геометричні параметри інструменту, параметри і структуру несучої системи верстата), впливати на параметри регулювання (механіка процесу різання, наростоутворення, стружкоутворення, теплові явища, сила та міцність різання, вібрації) та одержати необхідні технологічні параметри (точність, якість, стійкість міцність інструменту, продуктивність, економічність, форма стружки) (рис. 1).

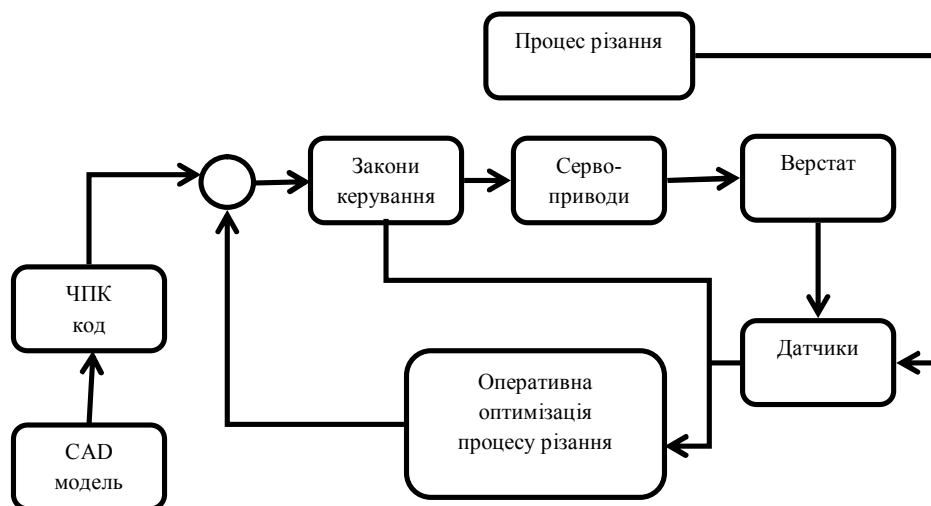


Рис. 1. Схема управління процесом обробки

Оптимальна продуктивність верстатної системи визначається, в основному, такими параметрами режиму різання, як швидкість, глибина та подача. Максимально допустима подача, як правило, обмежується ефективною потужністю або крутним моментом верстата, міцністю слабкої ланки

механізму подачі верстата, жорсткістю оброблюваної деталі, міцністю та жорсткістю інструменту, шорсткістю оброблюваної деталі. Глибина різання найчастіше обмежена величиною припуску, а іноді, як і подача, жорсткістю технологічної системи або потужністю приводу.

Що стосується швидкості різання, то її оптимальне значення залежить від критерію оптимальності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У металообробці як критерії оптимальності широко використовуються мінімум собівартості продукції [1] чи максимум продуктивності верстатної системи [2].

У теорії і практиці визначення оптимальних режимів різання виявлення економічно оптимальних режимів звелось до знаходження режимів найменшої собівартості продукції, конкретніше – до знаходження режимів найменшої собівартості технологічної операції (оскільки витрати на заготовку не залежать від режимів різання).

Як показано в [3] для підвищення продуктивності при заданому періоді стійкості інструменту необхідно працювати з можливо більшою площею зрізуючого шару, і відповідною швидкістю різання. Тут продуктивність обробки можна характеризувати основним технологічним часом обробки t_0 .

Оптимальним вважається режим різання, при якому досягається найкраще з точки зору об'єктивного критерію поєднання параметрів різання, засноване на фізико-технологічних і економічно-виробничих чинниках процесу механічної обробки [4]. Критерієм економічної оптимальності при виборі режимів різання в загальному випадку повинен служити мінімум витрат сукупної громадської праці, обумовлених виконанням технологічної операції, що складаються з повної собівартості цієї операції, з додаткових витрат, обумовлених капітальними вкладеннями.

Критерій оптимальності необхідно вибирати відповідно до конкретних виробничих умов і обставин. На це вказується в роботах А.О. Маталіна, Г.І. Грановського [5]. У роботі [6] вводиться термін «експлуатаційна ситуація», що характеризується умовами, в яких експлуатується машина. Вплив виробничих обставин на вибір оптимальних режимів різання в умовах масового виробництва аналізувався в роботі О.М. Іноземцева [7]. У роботі І.М. Колесова [8] вказується, що «автоматичне управління виробничим процесом повинно вестися по ситуації, що склалася, для цього потрібні відповідні техніка, інформація, алгоритми її перетворення й управління».

Якби елементи критерію оптимальності, не були обмежені якими-небудь умовами, то проблема оптимальності не мала б сенсу [9].

Проблема оптимальності існує за наявності взаємно суперечливих обмежуючих умов і полягає у виборі такого варіанта, коли критерій оптимальності досягає екстремуму. Розгляду обмежень і дослідженню їх впливу на оцінювальну функцію присвячені роботи [10–13].

Аналіз джерел показує, що найважливішим чинником ухвалення рішень про оптимальність умов експлуатації різального інструменту є його стійкість. Аналіз великої кількості літературних джерел показав, що багато дослідників визначають період стійкості інструменту як час праці для досягнення певного стану, що обумовлює відмову, тобто в загальному випадку стійкість є властивість інструменту виконувати задані функції, зберігаючи експлуатаційні показники в необхідних межах впродовж певного проміжку часу або напрацювання. Таким чином, стійкість є однією з характеристик надійності, тобто однією зі складових якостей інструменту [14].

Виробничі процеси носять імовірнісний характер, зумовлений неминучими змінами численних чинників, серед яких можна вказати [14]: точність розмірів і стабільність форми, мікроструктури, фізико-механічних властивостей заготовок; фізико-механічні властивості та геометричні параметри різальної частини інструменту; приховані дефекти різальної частини інструменту і різні зовнішні дії, що призводять до аварійних ситуацій (незадовільне закріплення заготовки або відведення стружки, порушення режиму охолодження та ін.); жорсткість технологічної системи і спосіб налагодження інструменту; якість обслуговування інструменту, що полягає в мірі об'єктивності оцінки, необхідності його заміни або відновлення.

Проте, як показали дослідження [15], кореляція перерахованих чинників з розкидом стійкості інструменту або повністю відсутня, або незначна і лише при сукупній дії одного або декількох чинників можна говорити про їх вплив.

Формули стійкості інструменту і швидкості різання дійсні тільки в тих діапазонах використовуваних параметрів, в яких показники міри при цих величинах залишаються незмінними й один від одного незалежними.

Мета роботи: підвищення продуктивності та точності обробки на важких верстатах шляхом розробки інформаційних технологій для інтегрального комплексу оптимального управління технологічною системою.

Викладення основного матеріалу. Відомо, що при детермінованому підході до оптимізації швидкості різання виходять з величини стійкості найбільшої продуктивності або економічної стійкості (стійкості найменшої собівартості деталі-операції). Відповідно в довідниках по режимах різання швидкості різання розраховуються, виходячи з нормативної стійкості. Оптимальна швидкість різання

повинна забезпечувати нормативну стійкість. Чинник випадковості стійкості інструменту враховується тим, що середня стійкість має бути рівною нормативній. Відхилення від нормативних умов різання враховуються відповідними корегуючими коефіцієнтами.

Процедури самонавчання відрізняються тим, що про реальний процес потрібно мінімальну апіорну інформацію. Процедури гарантують, що після кінцевого числа ітерацій буде досягнута оптимальна швидкість різання за заданим критерієм оптимальності. З практичної точки зору, важливо так обрати параметри алгоритму самонавчання, щоб число ітерацій було мінімальне. Цю обставину і буде надалі досліджено.

Облік наявної апіорної інформації дозволяє прискорити процес «навчання алгоритму», але це неминує веде до його ускладнення. Надалі будуть розглянуті відповідні процедури. Зокрема буде розглянута процедура самонавчання на основі методу найменших квадратів, в якій вид стійкісної залежності передбачається відомим з точністю до значень констант стійкісної залежності, які в процесі навчання уточнюються від ітерації до ітерації разом з оптимізацією швидкості різання.

Далі наведемо відомі процедури самонавчання стосовно процесу різання і запропонуємо нові процедури, що зважають на специфіку процесу різання на металорізальних верстатах.

Досліджені раніше процедури Робіна–Монро і Кіфера–Волфовіца відрізняються простотою і вимагають мінімум апіорної і поточної інформації про процес різання. Але, як наслідок, збіжність до оптимуму виявляється занадто повільною, щоб їх ефективно використовувати на практиці.

Завдання максимального прискорення процесу самонавчання є актуальним. Зокрема, цього можна досягти більш повно використовуючи апіорну і поточну інформацію про процес різання.

Значно можна прискорити процес самонавчання, використовуючи вид стійкісної залежності в області оптимальних швидкостей різання. Тоді в процесі самонавчання можна послідовно уточнювати параметри стійкісної залежності, використовуючи дані всіх попередніх ітерацій і швидкість різання для наступної ітерації розраховувати з урахуванням уточненої стійкісної залежності.

Для опису залежності стійкості різального інструменту від швидкості різання запропоновано декілька формул. Проте на практиці найбільше поширення отримала степенева залежність запропонована Тейлором [16]. Хоча дійсна стійкісна залежність значно складніша, в обмеженому інтервалі швидкостей її завжди можна досить точно апроксимувати відміченою степеневою залежністю, чим і користуються на практиці.

Завдання, таким чином, полягає в тому, щоб за дослідним значенням стійкості T_1, T_2, T_i отриманим при швидкостях різання V_1, V_2, \dots, V_i найкраще оцінити параметри стійкісної залежності й розрахувати точнішу швидкість різання V_{i+1} для наступної ітерації процесу самонавчання.

Як і раніше, під стійкісною залежністю розумітимемо степеневу функцію:

$$\bar{T} = \frac{C_t}{V^m S^x t^y},$$

де \bar{T} – середня стійкість в хвилини часу різання; V – швидкість різання, мм/хв.; S – подача, мм/об. шпинделя; t – глибина різання, мм; C_t, m, x, y – емпіричні константи – параметри стійкісної залежності, які оцінюються дослідним шляхом в результаті стійкісного експерименту або безпосередньо в процесі обробки.

Припустимо, що є вибірка дослідних даних про стійкість T_1, T_2, \dots, T_N , що отримана при режимах різання $V_1, S_1, t_1'; V_2, S_2, t_2'; \dots; V_N, S_N, t_N'$ відповідно.

Процедура оцінки параметрів стійкісної залежності полягає в тому, що треба знайти такі значення параметрів C, m, x, y , щоб відхилення стійкості мінімально відхилилися від фактичних значень.

Особливість оптимізації процесу різання в режимі самонавчання полягає в тому, що не всі параметри режиму різання потребують такої оптимізації. Глибину різання t вигідно брати максимально можливою в межах припуску на обробку. Подачу S теж вигідно брати максимальною, виходячи з технологічних обмежень, можливостей верстата й інструменту. Залишається тільки швидкість різання V . У зв'язку з цим стійкісну залежність можна спростити:

$$T = \frac{C}{V^m}, \quad (1)$$

де константа C залежить від усіх інших параметрів режиму різання, яке в процесі самонавчання передбачається незмінним, і оцінці підлягають тільки параметри C і m .

Розглянемо тепер різні варіанти оцінки, що мають практичний і теоретичний інтерес.

Показник – стійкість інструменту.

В цьому випадку критерій оптимальності оцінки виражається так:

$$\Delta_1(C, m) = \frac{1}{N} \sum_i (T_i - \bar{T})^2 = \frac{1}{N} \sum_i \left(T_i - \frac{C}{V_i^m}\right)^2. \quad (2)$$

Рівняння в даному випадку набирають вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial C} &= \frac{2}{N} \sum_i (T_i - \frac{C}{V_i^m}) \cdot \frac{-1}{V_i^m} = 0, \\ \frac{\partial \Delta_1}{\partial m} &= \frac{2}{N} \sum_i (T_i - \frac{C}{V_i^m}) \cdot \frac{-\ln V_i}{V_i^m} = 0. \end{aligned} \tag{3}$$

Після необхідних перетворень для оцінки параметрів C і m отримуємо систему з двох рівнянь:

$$C = \frac{\frac{1}{N} \sum_i T_i}{\frac{1}{N} \sum_i V_i^{-2m}}; \tag{4}$$

$$\varphi_1(C, m) = C \cdot \frac{1}{N} \sum_i \frac{\ln V_i}{V_i^{2m}} - \frac{1}{N} \sum_i \frac{T_i \cdot \ln V_i}{V_i^m} = 0 \tag{5}$$

Система нелінійна і не має явного рішення, тому її доводиться вирішувати чисельно.

Один з можливих алгоритмів чисельного рішення цієї системи полягає в наступному. Користуючись довідковими даними, задаємо діапазон можливих значень показника m , тобто такі m_1 і m_2 , щоб напевно виконувалися нерівності:

$$m_1 < m < m_3.$$

З кроком Δm , рівним, наприклад, 0,1, починаючи з m_1 , в циклі розраховуємо спочатку C , а потім функцію $\varphi_1(C, m)$ до тих пір, поки функція $\varphi_1(C, m)$ не змінить знак. Нехай $\varphi_1^-(C^-, m^-)$ найближче до нуля негативне значення функції $\varphi_1(C, m)$, а $\varphi_1^+(C^+, m^+)$ – позитивне значення цієї функції, тоді користуючись методом хорд отримуємо з достатньою для практики точністю, що:

$$m = \frac{\varphi_1^+ m^- - \varphi_1^- m^+}{\varphi_1^+ - \varphi_1^-} \tag{6}$$

Показник – логарифм стійкості інструменту.

Такий показник практично зручний тим, що стійкісна залежність в логарифмічних координатах стає лінійною, що дозволяє отримати явні формули для оцінки параметрів C і m .

Критерій оптимальності в даному випадку виражається так:

$$\Delta_2(C, m) = \frac{1}{N} \sum_i (\ln T_i - \ln \bar{T})^2 = \frac{1}{N} \sum_i (\ln T_i - \ln \frac{C}{V_i^m})^2 \tag{7}$$

Система в даному випадку виглядає так:

$$\frac{1}{N} \sum_i (\ln C_i \cdot \ln V_i - \ln C \cdot \frac{1}{N} \ln V_i) = 0 \tag{8}$$

Тут введено позначення, що скорочує:

$$C_i = V_i^m \cdot T_i \tag{9}$$

Після необхідних перетворень отримуємо явні формули для оцінки C і m , а саме:

$$m = \frac{K_1 \cdot K_2 - K_{12}}{K_{11} - K_1^2} \tag{10}$$

$$\ln C = K_2 + m \cdot K_1, \tag{11}$$

де

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{1}{N} \sum_i \ln V_i \\ K_2 &= \frac{1}{N} \sum_i \ln T_i, \\ K_{12} &= \frac{1}{N} \sum_i \ln V_i \cdot \ln T_i, \\ K_{11} &= \frac{1}{N} \sum_i \ln^2 V_i, \\ K_{22} &= \frac{1}{N} \sum_i \ln^2 T_i \end{aligned} \tag{12}$$

коефіцієнти, відповідні статистичним моментам пари $(\ln V, \ln T)$.

Якщо підставити оцінки, то отримаємо вираження для мінімуму критерію:

$$\Delta_2^*(m, C) = m^2 \cdot K_{11} + 2m \cdot K_{12} + K_2^2 - \ln^2 C \quad (13)$$

Цю величину можна розглядати як статистичну дисперсію логарифма стійкості і використовувати для оцінки коефіцієнта варіації остюка, що буде зроблено надалі.

Показник – відносне відхилення розрахункової стійкості від дослідної.

Необхідно зажадати, щоб стала мінімальною відносна помилка розрахунку стійкості

$$\Theta_3 = \frac{\bar{T} - T_i}{T_i} \quad (14)$$

критерій оптимальності прийме вигляд:

$$\Delta_3(C, m) = \frac{1}{N} \sum_i \left(\frac{\bar{T} - T_i}{T_i} \right)^2 = \frac{1}{N} \sum_i \left(1 - \frac{C}{V_i^m T_i} \right)^2 \quad (15)$$

Рівняння в даному випадку після необхідних перетворень набудуть вигляду:

$$\begin{cases} C = \frac{\frac{1}{N} \sum_i V_i^{-m} T_i^{-1}}{\frac{1}{N} \sum_i V_i^{-2m} T_i^{-2}} \\ \varphi_3(C, m) = C \cdot \frac{1}{N} \sum_i \frac{\ln V_i}{V_i^{2m} T_i^2} - \sum_i \frac{\ln V_i}{V_i^m T_i} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

Ця система рівнянь вирішується чисельно.

Показник – відносне відхилення розрахункової інтенсивності зносу від дослідної.

Якщо $\frac{1}{\bar{T}}$ і $\frac{1}{T_i}$ – розрахункова і дослідна інтенсивності зносу, то цей показник запишеться так:

$$\Theta_4 = \frac{\frac{1}{\bar{T}} - \frac{1}{T_i}}{\frac{1}{T_i}} = \frac{T_i - \bar{T}}{\bar{T}} \quad (17)$$

а критерій оптимальності прийме вигляд:

$$\Delta_4(C, m) = \frac{1}{N} \sum_i \left(\frac{\bar{T} - T_i}{\bar{T}} \right)^2 = \frac{1}{N} \sum_i \left[\frac{\left(T_i - \frac{C}{V_i^m} \right)}{\frac{C}{V_i^m}} \right]^2 \quad (18)$$

Перевага показника в тому, що фактична стійкість може виявитися малою або навіть рівною нулю, наприклад, у разі поломки різальної пластини при першому врізуванні, що призведе до значного спотворення оцінки. Після диференціювання і необхідних перетворень отримуємо систему для оцінки m і C :

$$\begin{cases} C = \frac{\frac{1}{N} \sum_i V_i^{2m} T_i^2}{\frac{1}{N} \sum_i V_i^m T_i}; \\ \varphi_3(C, m) = C \cdot \frac{1}{N} \sum_i V_i^m T_i \ln V_i - \frac{1}{N} \sum_i V_i^{2m} T_i^2 \ln V_i \end{cases} \quad (19)$$

Показник – інтенсивність зносу інструменту.

В цьому випадку вимагається, щоб фактична інтенсивність зносу $\frac{1}{T_i}$ – найменше відрізнялася від розрахункової:

$$\frac{1}{T} = \frac{V^m}{C} \quad (20)$$

Критерій оптимальності оцінки в цьому випадку виражений так:

$$\Delta_5(C, m) = \frac{1}{N} \sum_i \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{\bar{T}} \right)^2 = \frac{1}{N} \sum_i \left(\frac{1}{T_i} - \frac{V_i^m}{C} \right)^2 \quad (21)$$

а рівняння для оцінки параметрів C і m набувають такого вигляду:

$$\left\{ \begin{aligned} C &= \frac{1}{N} \sum_i V_i^{2m}; \\ &= \frac{1}{N} \sum_i V_i^m T_i^{-1}; \end{aligned} \right. \quad (22)$$

$$\varphi_5(C, m) = C \cdot \frac{1}{N} \sum_i V_i^m \ln V_i T_i^{-1} - \frac{1}{N} \sum_i V_i^{2m} \ln V_i = 0$$

Показник – собівартість операції.

Сама стійкість, інтенсивність зносу інструменту й інші розглянуті вище показники не можуть безпосередньо служити критеріями оптимізації режиму різання. В цьому випадку як показник для методу найменших квадратів доцільно взяти змінну частину собівартості операції, тобто шукатимемо такі C і m за досвідченими даними для стійкості, щоб погрішність розрахунку відміченої собівартості була можливо меншою.

Відомо, що змінна частина собівартості операції пов’язана зі стійкістю і швидкістю різання таким чином:

$$\Theta_6 = t_p \left(1 + \frac{\Delta\Lambda}{T}\right) \quad (23)$$

де t_p – час робочого ходу, Δ – витрати за період стійкості, пов’язані із заміною і підналагодженням інструменту в верстатохвилинах, Λ – коефіцієнт часу різання, Θ – змінна частина собівартості операції в верстатохвилинах.

Критерій оптимальності оцінки в цьому випадку виражений так:

$$\Delta_6(C, m) = \frac{1}{N} \sum_i \left[t_{pi} \left(1 + \frac{\Delta\Lambda}{T_i}\right) - t_{pi} \left(1 - \frac{\Delta\Lambda}{T}\right) \right]^2 \quad (24)$$

Якщо врахувати, що:

$$f(\rho, \alpha, t) = \frac{\alpha}{\rho} \left(\frac{t}{\rho}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{t}{\rho}\right)^\alpha}, \quad t \geq 0 \quad (25)$$

де α, ρ – параметри розподілу.

Середня стійкість через ці параметри виражається таким чином:

$$\bar{T} = \rho \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (26)$$

де Γ – гамма функція [65]. Параметр α однозначно пов’язаний з коефіцієнтом варіації стійкості K_σ :

$$K_\sigma = \sqrt{\frac{\Gamma \left(1 + \frac{2}{\alpha}\right)}{\Gamma^2(1 + \alpha)}} \quad (27)$$

і пропонується незалежним від швидкості різання. Від швидкості різання залежить тільки параметр розподілу ρ , тобто:

$$\rho = \frac{C}{V^m} \Gamma^{-1} \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (28)$$

Таким чином, в даному випадку за дослідними даними треба оцінити три параметри: C і m , як при методі найменших квадратів і параметр α , що характеризує міру розкиду стійкості як випадкової величини.

Функція правдоподібності.

Найкращі значення параметрів C, m, α повинні дати максимум функції правдоподібності:

$$L(C, m, \alpha) = \ln \left[f(\alpha, \rho, T_1) \cdot f(\alpha, \rho, T_2) \cdot \dots \cdot f(\alpha, \rho, T_N) \right] \quad (29)$$

Після підстановки явних виразів для щільності Вейбула і перетворень, що спрощують, отримаємо:

$$L(C, m, \alpha) = N \ln \alpha + (\alpha - 1) \sum_i \ln T_i - \alpha \sum_i \ln \rho_i - \sum_i \left(\frac{T_i}{\rho_i}\right)^\alpha \quad (30)$$

Параметри C, m, α дають максимум $L(C, m, \alpha)$, за таких умов:

$$\begin{aligned}\frac{\partial L(C, m, \alpha)}{\partial C} &= 0; \\ \frac{\partial L(C, m, \alpha)}{\partial m} &= 0; \\ \frac{\partial L(C, m, \alpha)}{\partial \alpha} &= 0.\end{aligned}\quad (31)$$

Після диференціювання та спрощуючих перетворень отримуємо такі три рівняння:

$$C^a = \frac{1}{N} \sum_i (T_i V_i^m)^a \quad (32)$$

$$a^{-1} = C^{-a} \frac{1}{N} \sum_i (T_i V_i^m)^a \ln T_i - \frac{1}{N} \sum_i T_i \quad (33)$$

$$\varphi_{(C, m, \alpha)} = C^a \frac{1}{N} \sum_i \ln V_i - \frac{1}{N} \sum_i (T_i V_i^m)^a \ln V_i = 0 \quad (34)$$

Ця система рівнянь може бути розв'язана чисельно методом ітерацій, виконуючи такі кроки:

1. При довільних початкових значеннях з параметрів m і a , узятих з області практично допустимих значень, користуючись першим рівнянням (2.58), визначений параметр C .

2. Використовуючи m , a , C з другого рівняння (2.59) уточнюємо значення параметра a .

3. При фіксованих значеннях C і a з третього рівняння методом хорд знаходимо уточнене значення m подібно до того, як це робилося при МНК.

Надалі знову виконується крок 1 при уточнених значеннях a та m і так далі доки уточнені значення параметрів C , m , a стануть трохи відрізнятися від цих значень у попередньому циклі ітерацій.

Результати досліджень реалізовані у дослідному зразку адаптивної системи керування для важкого токарного верстата та інтегральному комплексі оптимального управління адаптивною технологічною системою. Результати роботи використані для розробки сучасних важких верстатів нового покоління, аналогів яких ще не існує. Розроблені верстати повністю конкурентоспроможні на світовому рівні.

Висновки:

1. Виявлено значущі параметри і розроблено математичні моделі для реалізації системи адаптивного оптимального управління процесом механічної обробки на важких верстатах.

2. Розроблено інформаційні технології та програмний комплекс для реалізації системи адаптивного оптимального управління процесом механічної обробки на важких верстатах та багаторівнева система прийняття рішень з елементами штучного інтелекту.

3. Створено систему математичних моделей та інтегральний комплекс оптимального управління адаптивною технологічною системою важких верстатів.

4. Подальші дослідження систем адаптивного управління важким обладнанням необхідно проводити в напрямку розробки оперативної оптимізації процесів різання для систем адаптивного управління важкими верстатами нового покоління.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения / *Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров.* – М. : Наука, 1988. – 480 с.
2. *Воинов К.Н.* Прогнозирование надежности механических систем / *К.Н. Воинов.* – Л. : Машиностроение, 1978. – 208 с.
3. *Балакишин Б.С.* Использование систем адаптивного управления для повышения точности и производительности обработки / *Б.С. Балакишин* // Станки и инструмент. – 1972. – № 4.
4. *Антонов А.В.* Повышение производительности и надежности черновой обработки на токарных станках с ЧПУ на основе диагностирования состояния инструмента и автоматического управления режимами резания : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / *А.В. Антонов.* – Л. : Ленингр. гос. ун-т, 1991. – 18 с.
5. *Грановский Г.И.* Резание металлов : учебник / *Г.И. Грановский, В.Г. Грановский.* – М. : Высшая школа, 1985. – 304 с.
6. *Никифоров А.Д.* Процессы управления объектами машиностроения : учеб. пособие / *А.Д. Никифоров, А.Н. Ковшов, Ю.Ф. Назаров.* – М. : Высшая школа, 2001. – 455 с.
7. *Иноземцев А.Н.* Структурно-параметрический синтез систем из параллельно работающих станков для токарной обработки изделий массового производства : дис. ... канд. техн. наук / *А.Н. Иноземцев.* – Тула, 1984. – 318 с.
8. *Колесов И.М.* Основы технологии машиностроения : учебник / *И.М. Колесов.* – М. : Машиностроение, 1997. – 592 с.

9. *Краплин М.А.* Повышение эффективности металлорежущего оборудования на основе оптимизации режимов его работы : дис. ... докт. техн. наук : 05.02.08 / *М.А. Краплин.* – Ростов-на-Дону, 1989.
10. *Хаев Г.Л.* Повышение эффективности обработки на тяжелых станках на основе исследований надежности, многокритериальной оптимизации параметров и режимов эксплуатации инструмента : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.03.01 / *Г.Л. Хаев.* – Станкин, 1992. – 33 с.
11. *Цыпкин Я.З.* Основы теории обучающихся систем / *Я.З. Цыпкин.* – М. : Наука, 1970. – 252 с.
12. Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках / *А.М. Гильман и др.* – М. : Машиностроение, 1972. – 188 с.
13. *Пасько Н.И.* Научные основы машинно-ориентированного анализа и оптимизации станочных систем для обработки тел вращения : дис. ... докт. техн. наук / *Н.И. Пасько.* – Тула, 1983.
14. *Заренин Ю.Г.* Определительные испытания на надежность / *Ю.Г. Заренин, И.И. Стоянова.* – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 168 с.
15. *Клименко Г.П.* Основы рациональной эксплуатации режущего инструмента на тяжелых станках : дис. ... докт. техн. наук : 05.03.01 / *Г.П. Клименко.* – Краматорск, 2002. – 418 с.
16. *Тейлор Ф.* Искусство резать металл / *Ф.Тейлор.* – 2-е. изд.– 1902.

ВАСИЛЬЧЕНКО Яна Василівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри металорізальних верстатів та інструментів Донбаської державної машинобудівної академії.

Наукові інтереси:

- дослідження продуктивності та надійності технологічних систем;
- розробка та впровадження адаптивних систем керування роботою верстатів та інструментів.

Тел.: (050)814-77-30.

E-mail: yana.vasilchenko@mail.ru

Подано 10.05.2011

