

В. В. Калініченко, М. С. Мельник

Донбаська державна машинобудівна академія

**АВТОМАТИЗОВАНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ
ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ НА ВАЖКИХ ВЕРСТАТАХ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АНАЛІЗУ
ДАНИХ ДІАГНОСТИКИ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ**

У статті обґрунтовані принципові підходи до вирішення задачі автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах за результатами аналізу даних про процес різання, отриманих при його діагностиці. З метою практичного вирішення цієї задачі сформульовано принцип роботи та розроблено функціональну схему самонавчальної системи для автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки.

Ключові слова: токарна обробка на важких верстатах, режими різання, енергоефективність, автоматизований розрахунок, діагностика, аналіз даних, самонавчальна система.

V. V. Kalinichenko, M. S. Melnyk

**AUTOMATED DETERMINATION OF ENERGY-EFFICIENT TURNING MODES ON
HEAVY MACHINES BASED ON THE RESULTS OF ANALYSIS OF CUTTING PROCESS
DIAGNOSTIC DATA**

The article substantiates the principal approaches to solving the problem of automated determination of energy-efficient turning modes on heavy machines based on the results of the analysis of data on the cutting process obtained during its diagnosis. A general sequence for determining energy-efficient turning modes is presented, which provides for an automated calculation of modes based on dependencies built on the basis of the criterion of the minimum specific energy intensity of cutting, analysis of processing data obtained in the form of an array of diagnostic signals about the real cutting process and subsequent correction of the calculated dependencies based on the results of diagnostic data analysis. In order to solve the problem under consideration, a self-learning system for automated determination of energy-efficient turning modes is proposed. The principle of operation of the self-learning system has been formulated, and its functional scheme has been developed. The expected effect of the introduction of a self-learning system is formulated.

Keywords: turning on heavy machines, cutting modes, energy efficiency, automated calculation, diagnostics, data analysis, self-learning system.

Постановка проблеми. Однією з найактуальніших проблем машинобудівної галузі України є проблема підвищення енергоефективності виробничих процесів, чільне місце серед яких посідають процеси механічної обробки. З особливою гостротою зазначена проблема стоїть для високоенерговитратних процесів токарної обробки на важких верстатах. Заходи з практичного вирішення цієї проблеми мають передбачати забезпечення енергоефективних умов обробки [1]. Ключовим моментом при цьому є визначення енергоефективних режимів різання. Моделі для автоматизованого розрахунку таких режимів мають будуватися на використанні критеріїв оптимізації, пов'язаних з величиною енерговитрат у зоні різання. Особливістю токарної обробки на важких верстатах є значна кількість чинників, вплив яких на процес різання важко передбачити заздалегідь [2]. Врахування впливу цих чинників при визначенні енергоефективних режимів обробки може здійснюватися за результатами аналізу об'єктивних даних про процес різання, отриманих при його діагностиці. Відтак, набуває актуальності розробка методів та систем для автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах за результатами аналізу даних діагностики процесу різання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Широкому колу різнопланових питань, пов'язаних з енергоефективністю механічної обробки, присвячені роботи В. К. Старкова [3], А. В. Карпова [4–6], Д. Ю. Федориненка [7], Ж. А. Мрочка та співавторів [8], В. С. Гусарева та Ю. В. Ярового [9, 10], К. Grobmann [11], А. Vijayaraghavan та D. Dornfeld [12] та інших авторів. Різні дослідники пропонують у своїх роботах різні шляхи та способи підвищення енергоефективності процесів механічної обробки. Наприклад, у роботі [7] проаналізовані перспективні шляхи підвищення енергоефективності верстатного обладнання механічної обробки та запропонована оригінальна методологія підвищення енергоефективності верстатів на основі системного підходу до проектування їхніх конструкцій. Методологічні та практичні аспекти, що стосуються проектування та автоматизованого моніторингу роботи енергоефективного

верстатного обладнання, розглядаються у роботах [11, 12]. У роботі [8] наголошується на тому, що енергоощадна механічна обробка має базуватись на максимальному використанні активної потужності електродвигуна привода головного руху верстата. Разом з тим, у роботах [3–6, 9, 10] вирішення проблеми підвищення енергоефективності механічної обробки розглядається крізь призму забезпечення енергоефективних умов та параметрів процесу різання. Зниження витрат енергії на перебіг фізичних процесів у зоні різання досягається при цьому за допомогою оптимізації режимів обробки за критеріями, пов'язаними з рівнем енерговитрат при різанні.

Обґрунтований вибір критеріїв оптимізації є ключовою проблемою при створенні оптимізаційних моделей процесів механічної обробки. У практиці вирішення задач призначення режимів різання знаходять використання різні за своєю сутністю критерії оптимізації. Так, Ю. В. Яровий [13], виконуючи аналіз відомих критеріїв оптимізації технологічних процесів для операцій механічної обробки, класифікував їх на три наступні групи: 1) техніко-економічні (наприклад, собівартість, продуктивність, приведені витрати); 2) фізичні (оптимальна температура різання, інтенсивність зношування інструменту); 3) енергетичні (питома енергомідкість різання, енергетичний критерій якості, енергетичний коефіцієнт корисної дії процесу різання).

У оптимізаційних моделях процесів токарної обробки на важких верстатах традиційно найбільш широко використовують техніко-економічні критерії оптимізації [14]. Використання ж енергетичних критеріїв є обмеженим, попри високий рівень енерговитрат для вказаних процесів. Разом з тим, у роботі [15] відзначається, що моделі високоенерговитратних процесів токарної обробки на важких верстатах обов'язково повинні включати критерії оптимізації, пов'язані з рівнем енерговитрат при різанні. У роботі [16] до таких критеріїв були віднесені, зокрема, критерії мінімуму питомої енергомідкості різання $e \rightarrow \min$ [4], максимуму енергетичного коефіцієнта корисної дії процесу різання $K \rightarrow \max$ [5], максимуму безрозмірного енергетичного критерію для високоенерговитратних процесів чорнвої обробки $q_{\text{чорн}} \rightarrow \max$ [4], мінімуму критерію дії технологічної системи $D \rightarrow \min$ [10]. У вказаних роботах наведені характеристики критеріїв та математичні вирази для їхнього визначення.

Відзначена у [2, 17] відмінність реальних умов токарної обробки на важких верстатах від нормативних, зумовлена слабкопрогнозованим впливом значної кількості різних чинників на процес обробки, суттєво ускладнює автоматизоване визначення енергоефективних режимів різання за відповідними розрахунковими моделями. Разом з тим, можливості сучасних комп'ютерних та діагностичних засобів дозволяють забезпечити автоматизацію розрахунку режимів обробки з урахуванням результатів аналізу даних про вихідні параметри реального процесу різання, отриманих при його діагностиці [18]. Практична реалізація зазначеного підходу передбачає розробку самонавчальних систем (СНС) для автоматизованого визначення енергоефективних режимів обробки за результатами аналізу даних діагностики процесу різання.

Мета роботи – обґрунтувати принципові підходи до вирішення задачі автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах за результатами аналізу даних діагностики процесу різання; сформулювати принцип роботи та розробити функціональну схему самонавчальної системи для практичного вирішення цієї задачі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вирішення задачі автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах пропонується здійснювати шляхом розробки та реалізації оптимізаційної моделі, побудованої на базі використання енергетичного критерію оптимізації, що враховує питомі витрати енергії на перебіг фізичних процесів у зоні різання [15]. Такий критерій в залежності від специфіки поставленої задачі може бути єдиним критерієм оптимізації або враховуватися у якості складової при формуванні комплексного критерію багатокритеріальної оптимізації процесу обробки.

За результатами аналізу запропонованих у [3–6, 9, 10] енергетичних критеріїв оптимізації для використання у математичній моделі процесу токарної обробки на важких верстатах був обраний критерій мінімальної питомої енергомідкості різання, представлений у [16] як:

$$e = \frac{A_{\text{різ}}}{V} = \frac{N_{\text{еф}}}{P_{\text{різ}}} = \frac{N_{\text{еф}}}{v \cdot S \cdot t} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $A_{\text{різ}}$ – робота різання; V – об'єм зрізаного шару матеріалу заготовки, перетворюваного на стружку; $N_{\text{еф}}$ – ефективна потужність різання; $P_{\text{різ}}$ – продуктивність різання (об'єм матеріалу стружки, що видаляється за одиницю часу); v – швидкість різання; S – подача; t – глибина різання.

У якості переваг обраного критерію у роботах [3–5, 16] відзначені: чіткий фізичний сенс, універсальність, відносна простота визначення, беззаперечна доцільність у разі знаходження

умовних екстремумів техніко-економічних критеріїв на межі припустимих значень оптимізовуваних параметрів. Відомий монотонний характер залежностей питомої енергомідкості різання від подачі та швидкості різання [3] не вимагає спеціальних процедур пошуку екстремуму значення цільової функції у просторі можливих рішень. Використання ж альтернативних енергетичних критеріїв є більш доцільним не так для мінімізації величини енерговитрат на зняття стружки та утворення обробленої поверхні, як для вирішення інших задач, наприклад, виявлення резервів підвищення частки «корисної» складової роботи різання в загальному енергетичному балансі зони різання (критерії $K \rightarrow \max$, $q_{\text{чорн}} \rightarrow \max$) чи порівняння енергоефективності різних технологічних методів обробки (критерій $D \rightarrow \min$) [16].

Пропонована оптимізаційна модель розроблялась з урахуванням специфіки високоенерговитратних процесів токарної обробки на важких верстатах з ЧПК. Складнощі у проведенні експериментальних досліджень енергоефективності таких процесів, значні витрати матеріальних ресурсів та часу на них зумовили максимально повне використання апріорної інформації (в тому числі даних нормативів режимів різання [19]) при створенні моделі для визначення енергоефективних режимів обробки. Результати аналізу даних діагностики реальних випадків обробки при виконанні виробничої програми випуску деталей в подальшому мають стати основою для корегування моделі, початково розробленої на базі апріорної інформації.

Цільова функція пропонованої моделі процесу обробки матиме загальний вигляд [15]:

$$e = \min\{f(x, \omega) | x \in D\}, \quad (2)$$

де x – керовані параметри процесу обробки; ω – постійні вхідні параметри процесу обробки; D – область припустимих значень керованих параметрів.

Керованими параметрами процесу обробки у пропонованій моделі відповідно до [15] визначені частота n обертання шпинделю верстата та подача S різця, значення яких задаються керуючою програмою ЧПК. Безступінчасте регулювання значень n та S на сучасних важких верстатах з ЧПК дозволяє здійснювати пошук оптимальних значень керованих параметрів моделі у безперервному просторі значень, обмеженому областю D . Інші задані технологом параметри враховувались як вхідні і приймали фіксовані значення для заданого i -го випадку обробки.

Відповідно до виразу (1) та відомої пропорційної залежності ефективної потужності N_{ef} різання від величини тангенціальної складової P_z сили різання, мінімізація енерговитрат на зняття стружки та утворення обробленої поверхні деталі забезпечується за рахунок чинників, що знижують силове навантаження у зоні різання при зменшенні величини P_z . Відтак, реалізація моделей для автоматизованого визначення енергоефективних режимів різання має передбачати вираження зв'язку питомої енергомідкості різання з керованими та вхідними параметрами процесу обробки (КВППО) через ступеневі залежності P_z від цих параметрів. КВППО мають відповідати таким умовам обробки, що забезпечують мінімізацію P_z . Перспективними чинниками зниження силового навантаження у зоні різання можуть бути, зокрема, використання різального інструменту з покриттям [20] та полегшення умов деформації матеріалу заготовки при введенні додаткової теплової енергії (наприклад, при електроконтактному нагріванні матеріалу) [21].

З урахуванням положень і рекомендацій роботи [6] та відомих розрахункових методик теорії різання формула для визначення питомої енергомідкості різання при поздовжньому точінні циліндричних поверхонь деталей (для попередніх проходів) матиме наступний загальний вигляд:

$$e = \left(C_e \cdot \frac{\pi^{n_{P_z}}}{1000^{n_{P_z}}} \cdot C_{P_z} \cdot K_{P_z} \right) \cdot \frac{D^{n_{P_z}} \cdot n^{n_{P_z}}}{t^{1-x_{P_z}} \cdot S^{1-y_{P_z}}}, \quad (3)$$

де C_e – коефіцієнт, що являє собою добуток постійних чисел у формулі для визначення величини e через відношення $\frac{A_{\text{різ}}}{V}$ (за винятком C_{P_z} , K_{P_z}); C_{P_z} – коефіцієнт, що враховує вплив незмінних умов обробки на величину P_z ; K_{P_z} – поправочний коефіцієнт на величину P_z ; D – діаметр обробки; n – частота обертання шпинделю верстата; t – глибина різання; S – подача різця; n_{P_z} , u_{P_z} , x_{P_z} – показники ступеня, що відображають залежність величини P_z відповідно від величини v , S , t .

Можливість використання інструменту з покриттям та електроконтактного нагрівання матеріалу заготовки з метою зниження силового навантаження у зоні різання зумовлює потребу врахування у формулі для визначення K_{P_z} [19] додаткових поправочних коефіцієнтів.

Відтак, значення поправочного коефіцієнта K_{P_z} у формулі (3) дорівнюватиме:

$$K_{P_z} = K_{M_{P_z}} \cdot K_{\varphi_{P_z}} \cdot K_{\gamma_{P_z}} \cdot K_{\lambda_{P_z}} \cdot K_{r_{P_z}} \cdot K_{\Pi_{P_z}} \cdot K_{E_{P_z}}, \quad (4)$$

де $K_{M_{P_z}}, K_{\varphi_{P_z}}, K_{\gamma_{P_z}}, K_{\lambda_{P_z}}, K_{r_{P_z}}, K_{\Pi_{P_z}}, K_{E_{P_z}}$ – поправочні коефіцієнти, що враховують вплив на величину P_z відповідно: механічних властивостей оброблюваного матеріалу ($K_{M_{P_z}}$), головного кута φ у плані різця ($K_{\varphi_{P_z}}$); переднього кута γ різця ($K_{\gamma_{P_z}}$); кута λ нахилу головної різальної кромки різця ($K_{\lambda_{P_z}}$); радіуса r_B при вершині різця ($K_{r_{P_z}}$); покриття різальної пластини ($K_{\Pi_{P_z}}$); режимів електроконтактного нагрівання матеріалу заготовки (сили електричного струму та напруги) ($K_{E_{P_z}}$).

Аналіз особливостей досліджуваних процесів обробки дозволив окреслити область D моделі (2) обмеженнями за заданою стійкістю різця та міцністю різальної пластини, що згідно з відомими розрахунковими методиками матимуть вигляд:

$$v \leq \frac{C_v}{T_H^{m_v} \cdot S^{y_v} \cdot t^{x_v}} \cdot K_v; \quad (5)$$

$$P_z \leq 333,2 \cdot t^{0,77} \cdot c^{1,35} \cdot \left(\frac{\sin 60^\circ}{\sin \varphi} \right)^{0,8}, \quad (6)$$

де C_v – коефіцієнт, що враховує вплив незмінних умов обробки на швидкість різання; T_H – нормативний період стійкості різця; m_v, y_v, x_v – показники ступеня, що відображають вплив відповідно заданого періоду T стійкості різця, подачі S та глибини t різання на швидкість різання; $K_v = K_{M_v} \cdot K_{z_v} \cdot K_{\gamma_{\%v}} \cdot K_{\text{чПК}_v} \cdot K_{\varphi_v} \cdot K_{\varphi_{1v}} \cdot K_{\text{МОР}_v}$ – поправочний коефіцієнт на швидкість різання; $K_{M_v}, K_{z_v}, K_{\gamma_{\%v}}, K_{\text{чПК}_v}, K_{\varphi_v}, K_{\varphi_{1v}}, K_{\text{МОР}_v}$ – поправочні коефіцієнти, що враховують вплив на швидкість різання відповідно: механічних властивостей оброблюваного матеріалу (K_{M_v}), стану поверхні заготовки (K_{z_v}), імовірності безвідмовної роботи різця ($K_{\gamma_{\%v}}$), обробки на верстатному обладнанні з ЧПК ($K_{\text{чПК}_v}$), головного кута φ у плані різця (K_{φ_v}), допоміжного кута φ_1 у плані різця ($K_{\varphi_{1v}}$), мастильно-охолоджуючої рідини ($K_{\text{МОР}_v}$); c – товщина різальної пластини; φ – головний кут різця у плані.

Вищевикладена логіка представлення математичних виразів оптимізаційної моделі процесу обробки передбачає представлення обмежень (5–6) у вигляді ступеневих виразів типу $n^{n_v} \cdot S^{y_v} \leq p_1, n^{n_{P_z}} \cdot S^{y_{P_z}} \leq p_2$, де $n_v, y_v, n_{P_z}, y_{P_z}$ – показники ступеня; p_1, p_2 – числа.

Значення коефіцієнтів та показників ступеня у формулах (3–5) приймаємо згідно з [19], за винятком $K_{\Pi_{P_z}}$ та $K_{E_{P_z}}$, що мають визначитися за результатами окремих досліджень.

Успішна реалізація запропонованої моделі процесу обробки передбачає наявність точних даних про значення усіх КВППО, а також коефіцієнтів та показників ступеня у ступеневих залежностях $v = f(T, S, t), P_z = f(v, S, t)$, використовуваних при розробці розрахункових формул моделі. Особливе значення має точність визначення тангенціальної складової P_z сили різання, адже зв'язок питомої енергомосткості різання з КВППО при розробці розрахункових формул моделі виражається саме через ступеневі залежності $P_z = f(v, S, t)$. Реалізація розрахункових алгоритмів моделі вимагатиме і точних даних про реальне значення частоти n обертання шпинделю, що використовуватиметься при розрахунку питомої енергомосткості різання.

У якості обставин, що ускладнюють здійснення токарної обробки на важких верстатах на енергоефективних режимах, автори у [2, 17] відзначають: відмінність реальних умов обробки від нормативних внаслідок дії факторів, вплив яких на процес обробки важко передбачити заздалегідь (це, зокрема, динамічний стан верстата, нестабільність властивостей матеріалів заготовки та інструменту, інших показників фактичного стану технологічної системи зі слабопрогнозованим впливом на процес обробки); вплив суб'єктивного фактору при врахуванні реальних умов обробки верстатником безпосередньо на робочому місці; відсутність необхідних нормативних даних. Тому автоматизоване визначення енергоефективних режимів обробки має враховувати об'єктивні дані про вихідні параметри процесу обробки, отримані при його діагностиці у реальному часі [17].

Відтак, загальна послідовність визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах передбачає автоматизований розрахунок режимів за залежностями, побудованими на базі критерію мінімальної питомої енергомосткості різання з використанням апріорної інформації, аналіз даних про обробку, отриманих у вигляді масиву діагностичних сигналів про вихідні параметри реальних процесів різання та подальшу корекцію розрахункових залежностей оптимізаційної моделі за результатами цього аналізу.

З метою практичної реалізації наведеної послідовності дій авторами запропоновано самонавчальну систему (СНС) для автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах. Принцип роботи СНС полягає у наступному. Згідно з [22], до пам'яті обчислювального пристрою (ОП) системи за допомогою панелі оператора вводяться передбачені алгоритмом реалізації моделі процесу обробки формули для розрахунку енергоефективних значень подачі S_e та частоти n_e обертання шпинделю, а також значення необхідних для розрахунку вхідних параметрів. Коефіцієнти та показники ступеня у використовуваних у моделі залежностях $v = f(T, S, t)$ та $P_z = f(v, S, t)$ автоматично визначаються за табличними даними бази знань (БЗ) СНС і теж вводяться до пам'яті ОП СНС. Зміст інформації про параметри процесу обробки, що вводиться до пам'яті ОП СНС перед початком розрахунку, наведений у таблиці 1 (позначення коефіцієнтів та показників ступеня відповідають [19]).

Табл. 1

Зміст інформації про параметри процесу обробки, що вводиться до пам'яті обчислювального пристрою самонавчальної системи перед початком розрахунку режимів обробки

Параметр процесу обробки	Джерело інформації про значення параметру
Інформація про вхідні параметри процесу обробки	
Марка оброблюваного матеріалу	Технологічний процес (ТП) обробки деталі
Марка інструментального матеріалу	
Різновид та стан оброблюваної поверхні заготовки	
Наявність та тип покриття різального інструменту	ТП обробки деталі, інформація виробників інструменту
Нормативний (заданий) період T_H (T_3) стійкості різця, хв	Нормативи режимів різання, інформація виробників інструменту
Глибина t різання, мм	ТП обробки деталі
Діаметр D обробки, мм	
Товщина s різальної пластини, мм	Довідкова література, інформація виробників інструменту
Головний кут φ різця у плані, °	
Допоміжний кут φ_1 різця у плані, °	
Передній кут γ різця, °	
Кут λ нахилу головної різальної кромки різця, °	
Радіус r_b при вершині різця, мм	
Межа σ_b міцності на розтяг оброблюваної сталі, МПа	Результати вимірювань величин σ_b та HV для матеріалу заготовки
Твердість оброблюваного матеріалу, HV	
Імовірність безвідмовної роботи різця γ_0 , %	Нормативи режимів різання, вимоги до надійності технологічної системи
Технологічні режими електроконтактного нагрівання матеріалу заготовки (сила I електричного струму, А; електрична напруга U , В)	Результати експериментальних досліджень токарної обробки з електроконтактним нагріванням матеріалу заготовки
Приведена жорсткість $J_{прив}$ системи «супорт–різець» верстата, Н/мм	Результати експериментальних досліджень характеристик жорсткості системи «супорт–різець» та розрахунку $J_{прив}$
Наявність та тип мастильно-охолоджуючої рідини	ТП обробки деталі
Коефіцієнти та показники ступеня у залежностях $v = f(T, S, t)$ та $P_z = f(v, S, t)$	
Коефіцієнти C_v , C_{P_z} у відповідних залежностях	Нормативи режимів різання, довідкова література
Показники ступеня m_v , γ_v , χ_v , n_{P_z} , U_{P_z} , χ_{P_z} у відповідних залежностях	

Поправочні коефіцієнти $K_{M_v}, K_{z_v}, K_{\gamma_{\%v}}, K_{\text{чПК}_v}, K_{\phi_v}, K_{\phi_{1v}}, K_{\text{МОР}_v}, K_{\text{МР}_z}, K_{\phi_{P_z}}, K_{\gamma_{P_z}}, K_{\lambda_{P_z}}, K_{\Gamma_{P_z}}, K_{\Pi_{P_z}}, K_{E_{P_z}}$ у формулах для визначення K_v, K_{P_z}	Визначення за табличними даними БЗ в залежності від відповідних вхідних параметрів процесу обробки
---	--

Представлений у табл. 1 зміст, за необхідності, доповнюється інформацією про інші вхідні параметри процесу обробки, вплив яких на рівень питомих енерговитрат у зоні різання для заданих умов процесу встановлено за результатами попередніх досліджень. Відповідно, структура БЗ СНС передбачатиме можливість доповнення новими табличними файлами для визначення показників ступеня (коефіцієнтів) у залежностях, що враховують вплив цих вхідних параметрів.

Реалізація розрахункових алгоритмів моделі дозволяє вирахувати значення S_e та n_e , за якими і має здійснюватися енергоефективна обробка деталі.

Збирання даних про вихідні параметри процесу обробки здійснюється вимірювально-діагностичними засобами (ВДЗ) СНС у реальному часі. Діагностичні сигнали цифрового формату передаються від ВДЗ до ОП СНС безпосередньо, сигнали аналогового формату – після перетворення аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) на сигнали цифрового формату.

Вище йшлося про важливість наявності точних даних про реальні значення частоти n обертання шпинделю та тангенціальної складової P_z сили різання для успішної реалізації моделі. Втім, особливості досліджуваної обробки, зокрема вплив динамічних процесів у технологічній системі, спричиняються до відмінності реальних значень n та P_z від розрахункових. Так, фактори, пов'язані з впливом коливань заготовки при обробці, зумовлюють відмінність у загальному випадку реальної частоти n_i обертання шпинделю для i -го випадку обробки від розрахункового значення $n_{\text{розра}}$. Вплив вібраційних процесів у системі «супорт–різець» верстата зумовлює непостійність реального значення P_{z_i} для i -го випадку обробки. Представимо значення P_{z_i} як суму незалежної від характеристик вібрацій у системі «супорт–різець» постійної складової $P_{z_{\text{пост}_i}}$ та змінної складової $P_{z_{\text{зм}_i}}$, яка визначається амплітудою $A_{\text{різ}_i}$ вібропереміщення вершини різця. Значення $A_{\text{різ}_i}$ отримуємо подвійним інтегруванням амплітуди A_{a_i} віброприскорення вершини різця за часом τ . Добуток $A_{\text{різ}_i}$ на приведену жорсткість $j_{\text{прив}}$ системи «супорт–різець» дає амплітудне значення змінної складової $P_{z_{\text{зм}_i}}$:

$$P_{z_{\text{зм}_i}} = j_{\text{прив}} \cdot \iint A_{a_i} d\tau d\tau. \quad (7)$$

Сучасна практика токарної обробки на важких верстатах характеризується все частішим використанням нових оброблюваних та інструментальних матеріалів. При цьому, як у нормативах режимів різання, так і у каталогах фірм-виробників різального інструменту відсутня інформація про значення коефіцієнтів та показників ступеня у залежностях $v = f(T, S, t)$ та $P_z = f(v, S, t)$ для токарної обробки саме з використанням цих нових оброблюваних та інструментальних матеріалів. Зазначена обставина суттєво ускладнює отримання розрахункових формул моделі для визначення енергоефективних режимів обробки. За відсутності рекомендацій щодо нормативних режимів різання автори пропонують використовувати при розробці розрахункових формул моделі ступеневі залежності $v = f(T, S, t)$ та $P_z = f(v, S, t)$, отримані для умов обробки, що відповідають оптимальній температурі різання $\Theta_{\text{різ}_{\text{опт}}}$ для заданої пари «інструментальний–оброблюваний матеріал». Отримання цих залежностей можливе за результатами експериментальних досліджень з реєстрацією значень температури різання $\Theta_{\text{різ}}$ для випадків обробки з різними значеннями КВППО. Математична обробка результатів цих експериментів за спеціально розробленими алгоритмами з наступним визначенням $\Theta_{\text{різ}_{\text{опт}}}$ для заданої пари «інструментальний–оброблюваний матеріал» також може бути виконана за допомогою можливостей пропонованої СНС; інформація про результати досліджень при цьому має заноситися до відповідних табличних файлів БЗ СНС.

Таким чином, у якості інформативних вихідних параметрів реального процесу токарної обробки, значення яких для кожного i -того випадку обробки з заданим набором значень керованих та вхідних параметрів мають реєструватися ВДЗ та аналізуватися у ОП СНС, визначені: реальна частота n_i обертання шпинделю верстата; значення постійної складової $P_{z_{\text{пост}_i}}$ тангенціальної сили різання; значення амплітуди A_{a_i} віброприскорення вершини різця; температура $\Theta_{\text{різ}_i}$ різання.

У разі, якщо i -тий випадок обробки характеризується новим набором значень вхідних параметрів (НЗВП), дані про який відсутні у БЗ СНС, за заданим алгоритмом ОП СНС попередньо

визначає розрахункові значення енергоефективних подачі $S_{\text{ерозр}}$ та частоти обертання шпинделю $n_{\text{ерозр}}$ і вводить їх до програми ЧПК. Відомості про НЗВП, як і відповідні до нього значення коефіцієнтів та показників ступеня у розрахункових формулах для визначення $S_{\text{ерозр}}$ та $n_{\text{ерозр}}$ заносяться до БЗ СНС. Якщо ж НЗВП i -го випадку обробки вже був занесений до БЗ СНС, то обробка здійснюється з раніше розрахованими для цього НЗВП значеннями $S_{\text{ерозр}}$ та $n_{\text{ерозр}}$.

Реєстрація діагностичних сигналів зі значеннями n_i , $P_{z_{\text{пост}_i}}$, A_{a_i} , $\Theta_{\text{різ}_i}$ для кожного i -го випадку обробки, здійснюваного з попередньо визначеними $S_{\text{ерозр}}$ та $n_{\text{ерозр}}$, дозволяє сформувати масив даних про реальні процеси різання для вибірки з N випадків обробки. Значення n_i та $\Theta_{\text{різ}_i}$ заносяться до цього масиву даних безпосередньо; за отриманими при діагностиці процесу різання значеннями $P_{z_{\text{пост}_i}}$ та A_{a_i} і з урахуванням (7) ОП СНС визначає тангенціальну складову сили різання для кожного i -го випадку обробки: $P_{z_i} = P_{z_{\text{пост}_i}} + j_{\text{прив}} \cdot \iint A_{a_i} d\tau dt$.

Метою аналізу даних діагностики реальних процесів обробки є визначення коефіцієнтів та показників ступеня у ступеневих залежностях $v = f(T, S, t)$ та $P_z = f(v, S, t)$ за результатами регресійного аналізу вибірки з N діагностованих випадків обробки, що передбачає отримання рівнянь регресії у вигляді поліному:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + \dots + b_j \cdot X_j + \dots + b_k \cdot X_k, \quad (8)$$

де $Y = \ln y$; $X_j = \ln x_j$; y – функція відгуку; x_j – j -тий змінний фактор регресійної залежності; b_j – коефіцієнт регресії, значення якого показує ступінь впливу j -го змінного фактору x_j на значення функції y відгуку; k – кількість j -тих змінних факторів регресійної залежності.

Наявність даних діагностики для вибірки з мінімально необхідною для побудови рівняння регресії кількістю N_{min} випадків обробки дозволяє отримати рівняння залежності (8) для заданої функції відгуку. Після успішної перевірки отриманої залежності на адекватність може бути сформоване рівняння ступеневої залежності функції відгуку наступного загального вигляду:

$$y = C_y \cdot x_1^{b_1} \cdot \dots \cdot x_j^{b_j} \cdot \dots \cdot x_k^{b_k}, \quad (9)$$

де $C_y = e^{b_0}$ – коефіцієнт, що враховує вплив незмінних умов обробки на функцію відгуку.

Традиційно у ступеневих залежностях $v = f(T, S, t)$ та $P_z = f(v, S, t)$ вплив на функцію відгуку параметрів процесу обробки, взятих у якості керованих (а саме: періоду стійкості T різця, подачі S , глибини t різання для залежностей $v = f(T, S, t)$; режимів різання v, S, t для залежностей $P_z = f(v, S, t)$) відображається значеннями показників ступеня для відповідних змінних; в той же час вплив на функцію відгуку інших вхідних параметрів процесу (властивостей інструментального та оброблюваного матеріалу, геометричних параметрів різця тощо) відображається значеннями поправочного коефіцієнта на даний параметр. Реалізація запропонованих авторами даної роботи підходів дозволяє отримати рівняння регресії, в яких у якості змінних факторів x_j фігурували б усі параметри, що справляють статистично значимий вплив на значення функції y відгуку. Можливості сучасних обчислювальних пристроїв дозволяють отримувати за допомогою регресійного аналізу ступеневі залежності функції y від значної кількості k змінних факторів x_j . Відмінністю залежностей $v = f(T, S, t)$, $P_z = f(v, S, t)$, отриманих за результатами аналізу даних діагностики реальних процесів різання, від залежностей, представлених у довідковій літературі, є заміна кожного q -того поправочного коефіцієнта K_{v_q} , $K_{P_{z_q}}$ (q – номер конкретного поправочного коефіцієнта) на окремі вхідні параметри процесу обробки на множник у ступені, показник якого кількісно відображатиме вплив даного вхідного параметра на функцію відгуку. Це дозволяє більш точно враховувати вплив усіх k вхідних параметрів процесу обробки на значення функції відгуку, що забезпечить підвищення точності запропонованої моделі. Окремою проблемою, що має бути вирішена при алгоритмізації послідовності розрахунку, є представлення значень змінних факторів x_j для вхідних параметрів процесу, що у загальному випадку не мають числового виразу.

Відповідно до загального вигляду (9) залежностей $v = f(T, S, t)$ та $P_z = f(v, S, t)$, отриманих за результатами аналізу даних діагностики процесів обробки, значень коефіцієнта C_y і

показників ступеня у цих залежностях здійснюється корегування формул для розрахунку S_e та n_e . З накопиченням нових даних про реальні процеси обробки формули постійно уточнюються.

Функціональна схема запропонованої СНС наведена на рисунку 1. У якості ВДЗ СНС у наведеній схемі використовуються: для контролю реальної частоти n_i обертання шпинделю верстата – інкрементальний енкодер 1; для вимірювання значень $P_{z_{\text{пост}_i}}$ – тензометричний динамометр 2; для контролю A_{a_i} – датчик віброприскорення 3; вимірювання температури $\Theta_{\text{різ}_i}$ різання здійснюється термоелектричним методом за допомогою природньої термопари 4. Наявність контролю $\Theta_{\text{різ}}$ у СНС, серед іншого, дозволяє здійснювати порівняння параметрів розрахованих енергоефективних режимів обробки з режимами, що відповідають оптимальній температурі $\Theta_{\text{різ}_{\text{опт}}}$ різання. При виборі конкретних моделей обчислювальних пристроїв, АЦП та ВДЗ СНС мають бути дотримані умови сумісності інтерфейсів усіх взаємодіючих пристроїв.

У якості очікуваного ефекту від впровадження запропонованої СНС автори відзначають:

- підвищення рівня автоматизації керування верстатом та надійності технологічної системи за рахунок впровадження сучасних засобів діагностики процесу різання та автоматизованого розрахунку енергоефективних режимів обробки;
- зниження трудомісткості технологічної підготовки виробництва за рахунок автоматизації процедур визначення режимів різання;
- створення можливості проведення досліджень енергоефективності обробки у режимі реальної виробничої ситуації з поступовим накопиченням БЗ про обробку.

Висновки. У роботі обґрунтовані принципові підходи до вирішення задачі автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах за результатами аналізу даних діагностики процесу обробки. Вказані підходи передбачають автоматизований розрахунок енергоефективних значень подачі S_e різця та частоти n_e обертання

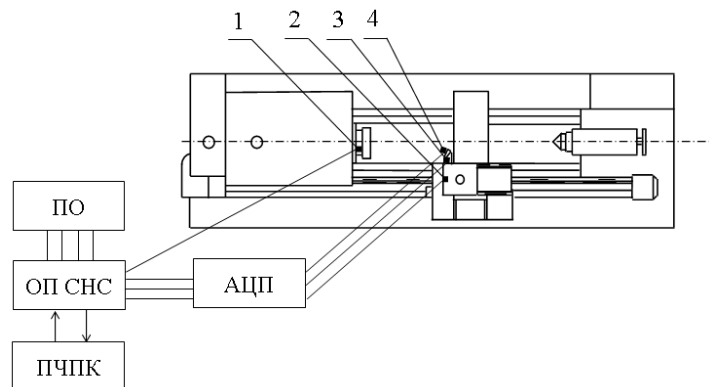


Рис. 1. Функціональна схема самонавчальної системи

ОП СНС – обчислювальний пристрій самонавчальної системи; ПЧПК – пристрій числового програмного керування; ПО – панель оператора; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

1 – інкрементальний енкодер; 2 – тензометричний динамометр;

3 – датчик віброприскорення; 4 – природня термопара

шпинделю за розрахунковими формулами, побудованими на базі критерію мінімальної питомої енергомісткості різання, аналіз даних про реальний процес обробки, отриманих у вигляді діагностичних сигналів про вихідні параметри процесу, та подальшу корекцію розрахункових формул за результатами проведеного аналізу, що дозволяє уточнити значення S_e та n_e . З метою практичної реалізації наведеного комплексу дій запропоновано самонавчальну систему; сформульовано принцип її роботи, розроблено функціональну схему системи. Очікуваним ефектом від впровадження запропонованої самонавчальної системи є: підвищення рівня автоматизації керування верстатом та надійності технологічної системи за рахунок впровадження сучасних засобів діагностики процесу різання та автоматизованого розрахунку енергоефективних режимів обробки; зниження трудомісткості технологічної підготовки виробництва за рахунок автоматизації процедур визначення режимів різання; створення можливості проведення досліджень енергоефективності токарної обробки на важких верстатах у режимі реальної виробничої ситуації з поступовим накопиченням бази знань про обробку.

Список використаних джерел.

© В. В. Калініченко, М. С. Мельник

1. Калініченко, В. В. Шляхи вирішення проблеми енергоефективності токарної обробки деталей важкого машинобудування / В. В. Калініченко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 04 – 07 травня 2019 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ : ДДМА, 2019. – С. 46.
2. Калініченко, В. В. Перспективи самонавчальних систем автоматизованого визначення режимів токарної обробки на важких верстатах / В. В. Калініченко, М. С. Мельник // Інформатика, управління та штучний інтелект. Тези восьмої міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : НТУ «ХПІ», 2021. – С. 59.
3. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 2009. – 640 с. – ISBN 978-5-94275-460-0.
4. Карпов, А. В. Об оценке энергетической эффективности технологических процессов обработки резанием / А. В. Карпов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2014. – № 2. – С. 61–68.
5. Карпов, А. В. Показатели энергетической эффективности процесса резания / А. В. Карпов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. Том 14. № 1. 2012. Пермь : Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2012. – С. 51–59.
6. Карпов, А. В. К вопросу управления процессом резания на основе энергетических закономерностей деформации и разрушения твердых тел / А. В. Карпов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 1 (8). – С. 37–49.
7. Федориненко, Д. Ю. Енергоефективність обробних верстатів / Д. Ю. Федориненко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки» : науковий збірник. – Чернігів : Черніг. нац. технол. ун-т, 2015. – № 2 (78). – С. 64–70.
8. Мрочек, Ж. А. Оценка и выбор критериев оптимальности системы резания по энергопотребляющим показателям технологического оборудования / Ж. А. Мрочек, Д. В. Адаменко, В. М. Адаменко // Вестник БНТУ, 2010. – № 5. – С. 11–14.
9. Гусарев, В. С. Исследование удельной работы формообразования при точении / В. С. Гусарев, Ю. В. Яровой // Труды Одесского политехнического университета, 2010. Вып. 1 (33) – 2 (34). – С. 61–64.
10. Гусарев, В. С. Экспериментальное исследование зависимости действия технологической системы от режимов формообразования / В. С. Гусарев, Ю. В. Яровой // Авиационно-космическая техника и технология, 2013. – № 7 (104). – С. 12–16.
11. Grobmann, K. Thermo-energetic Design of Machine Tools / K. Grobmann. – Springer International Publishing, 2015. – 261 p.
12. Vijayaraghavan, A. Automated Energy Monitoring of Machine Tools / A. Vijayaraghavan, D. Dornfeld // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2010. Vol. 59. – P. 21–24.
13. Яровой, Ю. В. Обоснование технологического процесса механической обработки на основе энергетических критериев : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Ю. В. Яровой; Одесский нац. политехнический университет. – Одесса, 2014. – 192 с.
14. Мироненко, Е. В. Научные основы создания систем агрегатно-модульных инструментов для тяжелых токарных станков : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / Е. В. Мироненко; Донбасская гос. машиностроительная академия. – Краматорск, 2003. – 417 с.
15. Мироненко, Е. В. Стратегия определения энергоэффективных технологических параметров токарной обработки деталей тяжелого машиностроения / Е. В. Мироненко, В. В. Калиниченко // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2016. – Вып. 86. – С. 83–95.
16. Мироненко, Є. В. Аналіз шляхів забезпечення енергоефективності процесів механічної обробки деталей у сучасному машинобудуванні / Є. В. Мироненко, В. В. Калініченко, Д. Є. Гузенко // Сучасні технології в машинобудуванні [Текст] : зб. наук. праць. – Вип. 13 / редкол. : В. О. Федорович (голова) [та ін.]. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – С. 159–172.
17. Калініченко, В. В. Алгоритми для автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах / В. В. Калініченко, М. С. Мельник // Інформатика, управління та штучний інтелект. Тези десятої міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – С. 29.

18. Васильченко, Я. В. Основы проектирования тяжелых станков с адаптивным управлением : дис. д-ра техн. наук : 05.03.01 / Я. В. Васильченко; Донбасская гос. машиностроительная академия. – Краматорск, 2017. – 341 с.

19. Общемашиностроительные нормативы режимов резания. Токарные и карусельные работы (выбор инструмента, режимов резания, определение расхода инструмента). – М.: ВНИИТЭМР, 1985. – 75 с.

20. Мироненко, Є. В. Проблеми та перспективи використання твердих сплавів зі зносостійкими покриттями при чорновій токарній обробці деталей важкого машинобудування / Є. В. Мироненко, В. В. Калініченко // Збірник наукових праць (електронна версія) X Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології у машинобудуванні РТМЕ-2022», 1–5 лютого 2022 р. – Івано-Франківськ – Яремче, 2022. – С. 109–112. – Режим доступу: https://drive.google.com/file/d/1Fw5epmBruamKZjUg-1KvhlOSOugU_6Vj/view.

21. Калініченко, В. В. Можливості зниження енерговитрат на перебіг процесу різання при чорновому точінні деталей на важких верстатах за схемою електромеханічної обробки / В. В. Калініченко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIX Міжнародної науково-технічної конференції 01–04 червня 2021 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ : ДДМА, 2021. – С. 53.

22. Калініченко, В. В. Структура та принцип роботи самонавчальної системи для автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах / В. В. Калініченко, М. С. Мельник // Інформатика, управління та штучний інтелект. Тези восьмої міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : НТУ «ХПІ», 2021. – С. 58.