

ПОЛУШКО МИКОЛАНаціональний технічний університет України "Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
e-mail: polushkomykola@gmail.com**ШЕВЧЕНКО ВАДИМ**Національний технічний університет України "Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
<https://orcid.org/0000-0002-9366-4118>
e-mail: Shevchenko.vadim.pbf@gmail.com

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ

У цій роботі розглядається розробка та впровадження автоматизованої системи контролю процесу обробки деталей, що використовує методи аналізу акустичної емісії та пружних деформацій. Її основною метою є виявлення зношування та прогнозування залишкового ресурсу інструменту, що дозволяє підвищити якість обробки, знизити рівень браку та оптимізувати виробничі процеси. Система інтегрується у виробничу інфраструктуру, що сприяє підвищенню ефективності роботи обладнання та зменшенню ризику аварійних ситуацій. Запропоновані алгоритми дають змогу оперативно реагувати на зміни параметрів обробки та запобігати виходу інструменту з ладу. Система забезпечує аналіз отриманих даних у реальному часі, що дозволяє коригувати режими обробки, зменшуючи навантаження на обладнання та покращуючи загальну продуктивність. Використання методів машинного навчання та аналізу великих даних підвищує точність прогнозування зношення та адаптацію технологічних параметрів до змінних умов. Визначення критичних порогових значень допомагає уникнути аварійних ситуацій та забезпечує стабільну роботу обладнання. Ключовою перевагою системи є її інтеграція із системами ЧПК, що дозволяє автоматично коригувати режими обробки без участі оператора. Вона також підтримує хмарні технології для централізованого зберігання та аналізу даних, що покращує точність і швидкість ухвалення рішень. Інформація про стан інструменту використовується для статистичного аналізу його ефективності та оптимізації параметрів обробки. Дослідження підтвердили, що система сприяє збільшенню ресурсу інструменту, зменшенню браку та зниженню енергоспоживання. Зменшення відходів та покращення якості кінцевої продукції підвищує економічну ефективність виробництва. Подальший розвиток може включати впровадження мультисенсорних технологій, цифрових двійників і нейромережевих алгоритмів для ще точнішого прогнозування та адаптації технологічних процесів.

Ключові слова: автоматизована система, контроль процесу обробки, різальний інструмент, віброакустичний сигнал, пружні деформації.

POLUSHKO MYKOLA, SHEVCHENKO VADIM

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING THE MACHINING PROCESS

This paper examines the development and implementation of an automated system for monitoring the machining process, utilizing methods of acoustic emission analysis and elastic deformation measurement. Its primary goal is to detect tool wear and predict the remaining tool life, which enhances machining quality, reduces defect rates, and optimizes production processes. The system integrates into the manufacturing infrastructure, improving equipment efficiency and minimizing the risk of emergency situations. The proposed algorithms enable real-time responses to changes in machining parameters, preventing tool failures. The system provides real-time data analysis, allowing for machining mode adjustments that reduce equipment load and enhance overall productivity. The application of machine learning methods and big data analysis improves wear prediction accuracy and adapts technological parameters to changing conditions. Determining critical threshold values helps prevent emergency situations and ensures stable equipment operation. A key advantage of the system is its integration with CNC systems, enabling automatic machining mode adjustments without operator intervention. Additionally, it supports cloud technologies for centralized data storage and analysis, improving decision-making accuracy and speed. Tool condition data is used for statistical analysis of tool efficiency and machining parameter optimization. Research has confirmed that the system contributes to increased tool life, reduced defects, and lower energy consumption. Waste reduction and improved final product quality enhance the economic efficiency of production. Future developments may include the implementation of multisensor technologies, digital twins, and neural network algorithms for even more accurate process prediction and adaptation.

Keywords: automated system, machining process monitoring, cutting tool, vibroacoustic signal, elastic deformations.

Постановка проблеми

У сучасних умовах промислового виробництва головними пріоритетами залишаються підвищення продуктивності, зменшення витрат та забезпечення високої якості продукції. Інтенсивний розвиток автоматизованих технологій та цифрових систем дозволяє значно покращити ефективність обробки деталей, оптимізувати процеси контролю, а також мінімізувати ризики несподіваних відмов обладнання. Автоматизовані системи контролю процесу обробки є невід'ємною частиною сучасного виробництва, що забезпечують безперервний моніторинг параметрів обробки та оперативне виявлення відхилень від нормальних режимів роботи [1].

Одним із найважливіших елементів механічної обробки є різальний інструмент, від якого значною мірою залежить якість та точність виготовлення деталей. У процесі експлуатації різальний інструмент зазнає значного механічного навантаження, що призводить до його зношування, деформації та поступового виходу з ладу. Несвоєчасне виявлення зношення інструменту може призвести до

погіршення якості обробки, збільшення відсотка бракованої продукції та підвищення виробничих витрат. Традиційні методи контролю працездатності різального інструменту часто є неефективними через їх обмежену швидкість та недостатню точність.

Впровадження автоматизованих систем контролю процесу обробки деталей дозволяє своєчасно визначати його зношення, прогнозувати залишковий ресурс та здійснювати корекцію режимів обробки. Такі системи базуються на аналізі різноманітних фізичних параметрів, зокрема акустичної емісії, пружних деформацій, температурних характеристик тощо. Аналіз цих параметрів у реальному часі дає змогу виявляти критичні відхилення та запобігати аварійним ситуаціям [2].

Автоматизовані системи контролю сприяють не лише підвищенню продуктивності виробництва, а й зменшенню людського фактора у процесі прийняття рішень. Наприклад, при виявленні ознак підвищеного зношення інструменту система може автоматично змінити режими різання, зменшити подачу або швидкість обертання, що дозволяє продовжити термін служби інструменту та забезпечити стабільну якість продукції.

Ще одним важливим аспектом автоматизованого контролю є інтеграція з іншими системами виробництва, зокрема з системами керування верстатами з ЧПК. Така інтеграція дозволяє створювати єдині інформаційні середовища, в яких дані про стан інструменту та параметри обробки постійно аналізуються і використовуються для вдосконалення технологічних процесів. Це сприяє створенню концепції "розумного виробництва" (Smart Manufacturing) [3], що передбачає використання штучного інтелекту, машинного навчання та IoT (Інтернету речей) для автоматичного прийняття рішень та адаптації виробничих процесів до змінних умов.

Застосування штучного інтелекту та методів великих даних (Big Data) у системах контролю відкриває нові можливості для прогнозування стану інструменту та оптимізації обробки. Наприклад, використання алгоритмів машинного навчання дозволяє аналізувати великі масиви даних про параметри обробки, виявляти закономірності зношення інструменту та на основі цього коригувати режими роботи для мінімізації негативного впливу [4]. Такі методи дозволяють значно підвищити надійність та точність контролю, зменшити втрати через передчасне вибуття інструменту з експлуатації та забезпечити ефективніше використання ресурсів.

Крім того, автоматизовані системи контролю процесу обробки деталей активно використовують технології доповненої реальності (AR) та цифрових двійників (Digital Twins) [5]. Цифровий двійник – це віртуальна копія фізичного об'єкта (наприклад, верстата або різального інструменту), яка в реальному часі відображає його стан та динаміку змін. Завдяки цьому можна моделювати поведінку системи в різних умовах, прогнозувати потенційні несправності та оптимізувати режими роботи без необхідності реальних експериментів.

Варто зазначити, що автоматизовані системи контролю також є важливим інструментом для гнучкого виробництва. Вони дозволяють швидко адаптуватися до змін у конструкції деталей, впроваджувати нові технології обробки та забезпечувати стабільну якість продукції навіть у малосерійних і дрібносерійних виробництвах [6]. Крім того, можливість інтеграції таких систем у хмарні платформи дає змогу зберігати та обробляти дані на віддалених серверах, що покращує швидкість аналізу та ефективність керування виробничими процесами.

Аналіз останніх джерел

У перспективі розвиток автоматизованих систем контролю процесу обробки деталей буде спрямований на підвищення їх швидкості, точності та адаптивності до змінних виробничих умов. Зокрема, важливим напрямком є розробка багатофункціональних сенсорних систем, які можуть одночасно контролювати кілька параметрів (вібрації, температуру тощо) та здійснювати комплексний аналіз зношення інструменту [7]. Додатково впровадження самоадаптивних алгоритмів, що працюють на основі нейронних мереж, дозволить системам контролю самостійно змінювати параметри аналізу залежно від умов експлуатації інструменту.

Метою роботи є: розробка автоматизованої системи обробки деталей на основі вимірювання акустичної емісії та пружних деформацій, що дозволяє своєчасно виявляти зношення інструменту, прогнозувати його залишковий ресурс та здійснювати корекцію технологічних режимів обробки.

Таким чином, розробка та впровадження таких систем є важливим кроком на шляху до цифровізації виробничих процесів, підвищення їх гнучкості та ефективності. Інтеграція автоматизованого контролю з сучасними технологіями штучного інтелекту, машинного навчання та IoT дозволяє створювати високотехнологічні системи, які здатні працювати у динамічних умовах сучасного виробництва та забезпечувати безперервний контроль якості продукції. Автоматизовані системи контролю дають змогу суттєво скоротити виробничі втрати, покращити прогнозування технічного стану обладнання та забезпечити високу надійність механічної обробки [8]. У результаті підприємства отримують змогу зменшити витрати на обслуговування та ремонт устаткування, що в довгостроковій перспективі сприяє підвищенню конкурентоспроможності та ефективності всього виробничого процесу.

Виклад основного матеріалу

Процес різання супроводжується сукупністю фізико-хімічних явищ, зокрема механічних, електричних, теплових, адгезійних і дифузійних процесів, що виникають під час взаємодії різального інструменту із заготовкою. Кожен із цих факторів впливає на параметри обробки, які містять інформацію

про умови різання. Визначення залежності між ними та ступенем зношення інструменту дає змогу оцінити його стан і прогнозувати залишковий ресурс роботи.

Результати експериментальних досліджень підтверджують, що найбільш інформативними характеристиками для контролю процесу обробки деталей є параметри акустичної емісії та пружних деформацій [9].

Отже, запропонована система контролю повинна базуватися на аналізі сигналів цих процесів. Водночас ключовим діагностичним показником є акустична емісія в зоні різання, оскільки вона формується під впливом основних фізико-механічних явищ і є надійним індикатором технічного стану інструменту. Саме тому в розробленій системі оцінка його зношування та коригування технологічного процесу здійснюватимуться на основі отриманих сигналів.

Автоматизована система контролю обробки містить два рівні діагностики.

Перший забезпечує оперативне реагування та аварійну зупинку в разі перевищення допустимих меж деформацій. Раптові зміни в поведінці матеріалу можуть свідчити про критичний рівень зношення, наявність твердих включень у заготовці або різке збільшення глибини різання під час чорнової обробки [10]. Однією з основних причин екстреного припинення роботи може бути й раптова поломка інструменту. Аналіз змін у характеристиках пружних деформацій дозволяє своєчасно ідентифікувати такі випадки та швидко на них реагувати.

Другий рівень виконує функцію оцінки стану інструменту та прогнозування його подальшого зношення. Він ґрунтується на аналізі комбінаційного параметра акустичної емісії [11], що враховує...

$$W_M = \frac{A^2 \cdot N_\Sigma}{K_\varepsilon}, \quad (1)$$

де $A^2 \cdot N_\Sigma$ – потужність акустичної емісії; A – амплітуда сигналу акустичної емісії; N_Σ – активність сигналу акустичної емісії; K_ε – коефіцієнт, що відображає вплив пружних деформацій на процес різання, може бути описаний через модуль пружності матеріалу та умови взаємодії інструменту із заготовкою.

Значення амплітуди та активності сигналу акустичної емісії визначаються шляхом аналізу отриманих даних сигналу акустичної емісії, а параметр пружних деформацій [12] обчислюється за наступною формулою:

$$K_\varepsilon = \frac{\sigma \cdot \varepsilon}{E} = \frac{F_c \cdot \Delta L}{A \cdot L \cdot E}, \quad (2)$$

де E – модуль пружності (модуль Юнга); $\sigma = \frac{F_c}{A}$ – напруження, яке обчислюється як сила різання (F_c) на одиницю площі (A); $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ – відносна деформація, визначається як відношення зміни довжини (ΔL) до початкової довжини (L).

Використовуючи співвідношення комбінаційного параметра акустичної емісії W_M та величини зносу різального інструменту, здійснюється аналіз ступеня зношення інструменту h_u обчислюється інтенсивність зношення та проводиться моделювання математичних моделей зношення. На основі цих моделей здійснюється прогнозування зношення інструменту. Після аналізу ступеня зношення, інтенсивності та попередньо прогнозованих значень робиться висновок про можливість внесення змін у режими обробки для зменшення зношення.

Математична модель зношення різального інструменту описується наступним чином:

$$h_u = \frac{\Delta h_u + (k_w \cdot j_u \cdot A^2 \cdot N_\Sigma)}{\frac{F_c \cdot \Delta L}{A \cdot E \cdot L}} = \frac{A \cdot (\Delta h_u + (k_w \cdot j_u \cdot A^2 \cdot N_\Sigma)) \cdot E \cdot L}{F_c \cdot \Delta L} \quad (3)$$

де Δh_u – наявне зношення, мм; j_u – інтенсивність зношення ($j_u = \frac{h_u(i)}{h_u(i-1)}$); k_w – поправочний коефіцієнт по співвідношенню зношення інструменту і комбінаційного параметру акустичної емісії, який визначається експериментально для різних комбінацій матеріалів «інструмент – деталь» і заноситься в базу даних.

Розрахунок прогнозованого зношення різального інструменту здійснюється за такою формулою:

$$h_{pr}(i+1) = \frac{j_u \cdot (h_u(i) + h_u(i-1))}{2} \quad (4)$$

Загальна функціональна блок-схема автоматизованої системи контролю процесу обробки деталей наведена на рис. 1, а алгоритм її функціонування представлений на рис. 2.

Система контролю складається з датчика, що вимірює сигнал акустичної емісії (поз. 1, рис. 1). Отриманий сигнал проходить через підсилювач (поз. 2) і фільтр низьких частот (поз. 3), після чого надходить до аналого-цифрового перетворювача (АЦП, поз. 6). Аналогічним чином обробляється сигнал, який реєструє пружні деформації різального інструменту (поз. 4): він спершу підсилюється (поз. 5), а потім передається до входу АЦП.

Подальший аналіз параметрів виконується за допомогою ЕОМ (поз. 12), яка містить блок оцінки інтенсивності та ступеня зношення (поз. 7). У цьому модулі, на основі даних про максимальні та мінімальні значення пружних деформацій (поз. 8), здійснюється моніторинг аварійних станів. У разі перевищення допустимих меж система надсилає сигнал аварійної зупинки на виконавчі механізми (поз. 15), до складу яких входять блок керування двигуном, система регулювання подачі та інші модулі.

Крім того, у блоці 7 аналізується інтенсивність зношення різального інструменту із використанням поправочного коефіцієнта k_w , що зберігається в базі даних (поз. 9). Для точнішої оцінки

враховуються режими роботи технологічно-оброблювальної системи, інформація про які надходить із блоку ЧПК (поз. 13) згідно з керуючою програмою (поз. 14).

Після визначення рівня зношення дані передаються до блоку 10, де проводиться моделювання процесу обробки, оцінюється залишковий ресурс інструменту та прогнозується його подальший стан на основі інформації від ЧПК. У блоці 11 формуються коригувальні та керуючі сигнали, що дозволяють змінювати режими обробки, які потім передаються до ЧПК.

Якщо корекція технологічних параметрів неможлива, система ініціює зупинку виробничого процесу або подає команду на заміну інструменту. ЧПК, отримуючи відповідні сигнали з блоку 11, вносить зміни в команди керування, які спрямовуються до виконавчих механізмів (поз. 15).

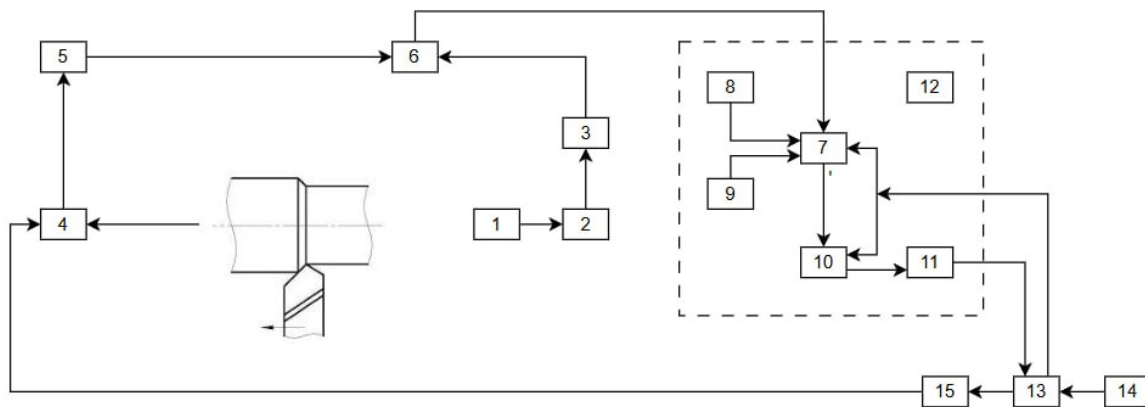


Рис.1. Блок-схема автоматизованої системи контролю процесу обробки деталей

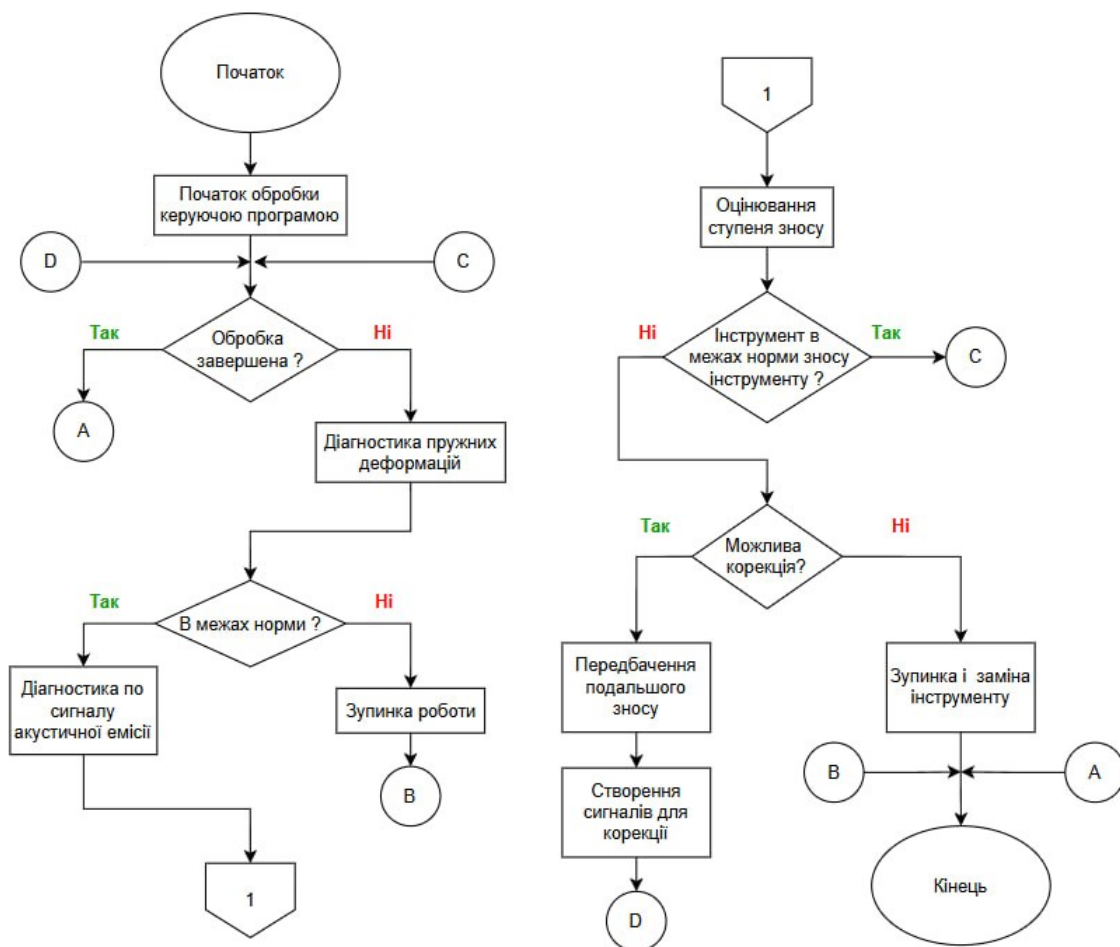


Рис.2. Алгоритм функціонування автоматизованої система контролю процесу обробки деталей

Висновки

Автоматизовані системи контролю процесу обробки деталей є важливим елементом сучасного виробництва, оскільки дозволяють значно підвищити точність і стабільність механічної обробки. Використання методів аналізу акустичної емісії та пружних деформацій забезпечує ефективний

моніторинг технічного стану інструменту в режимі реального часу. Це дозволяє своєчасно виявляти ознаки зношення, прогнозувати залишковий ресурс і запобігати аварійним ситуаціям.

Інтеграція таких систем із ЧПК, технологіями машинного навчання та Інтернету речей сприяє автоматичній корекції параметрів обробки, мінімізуючи людський фактор. Це, у свою чергу, допомагає зменшити виробничі витрати, оптимізувати використання інструменту та підвищити загальну ефективність роботи обладнання.

Подальший розвиток подібних систем може включати впровадження самонавчальних алгоритмів, цифрових двійників та хмарних технологій для централізованого аналізу даних. Усе це сприятиме підвищенню надійності виробничих процесів, зниженню рівня браку та створенню більш гнучких і адаптивних технологічних рішень у промисловості.

Література

1. Шевченко, В. (2024). Система контролю обробки деталей на автоматизованому виробництві. У М. Безуглий, Н. Бурау, В. Микитенко, Г. Тимчик, & А. Запорожець (Ред.), *Передові технології розробки систем I. Дослідження в системах, рішеннях та контролі* (т. 511). Springer, Cham.
2. Шевченко, В. В., Капінос, І. В., & Грабовський, Д. О. (2011). Система діагностики різального інструменту для обробки деталей на верстатах з ЧПК. *Проблеми легкої та текстильної промисловості України*, 1, 193–216.
3. Остаф'єв, В. А., Тимчик, Г. С., & Шевченко, В. В. (1983). *Адаптивна система управління. Механізація та автоматизація контролю* (с. 8–25). Київ.
4. Проць, Я. І., Савків, В. Б., Шкодзінський, О. К., & Ляшук, О. Л. (2011). *Автоматизація виробничих процесів: Підручник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів* (344 с.). Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя.
5. Одуола, О. М., Ікутегбе, К. А., & Акінлуваде, К. (2016). *Матеріали різальних інструментів та механізми зношування при обробці металів: В'язкість, гаряча твердість та зносостійкість як основні властивості матеріалів різальних інструментів у виробництві* (68 с.). LAP LAMBERT Academic Publishing.
6. *Автоматизація виробництва: механіка різання металів, вібрації верстатів та проектування ЧПК* (2-ге вид.) (2012). Кембридж.
7. Шарма, В. С., Шарма, С. К., & Шарма, А. К. (2007). Оцінка зношування різального інструменту при точінні. *Журнал інтелектуального виробництва*, 19, 89–118.
8. Гроше, П., & Ніцше, Г. (2007). Вплив температури на ініціацію адгезійного зношування щодо глибокого витягування алюмінієвих сплавів. *Журнал технологій обробки матеріалів*, 191(1–3), 314–316.
9. Матвієнко, С., Шевченко, В., Терещенко, М., Кравченко, А., & Іваненко, Р. (2020). Визначення складу на основі теплопровідності методом прямого нагріву термістора. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 9–39.
10. Цапенко, В., Терещенко, М., Тимчик, Г., Матвієнко, С., & Шевченко, В. (2020). Аналіз динамічного навантаження на стопу людини. У *2020 IEEE 40-а Міжнародна конференція з електроніки та нанотехнологій (ELNANO)* (с. 400–404). Київ, Україна.
11. Нортроп, Г. Р., Чек, Д. Ж., & Ульманн, Г. В. (2009). *Акустичний контроль матеріалів* (с. 35–40). Київ: Видавництво «Техніка».
12. Сусліков, Л. М., & Студеняк, І. П. (2016). *Методи неруйнівного контролю: Підручник* (с. 92–107). Ужгород: Видавництво УЖНУ.

References

1. Shevchenko, V. (2024). Systema kontroliu obrobky detalei na avtomatyzovanomu vyrobnytstvi. U M. Bezuhlyi, N. Burau, V. Mykytenko, H. Tymchik, & A. Zaporozhets (Red.), *Peredovi tekhnologii rozrobky system I. Doslidzhennia v systemakh, rishenniakh ta kontroli* (t. 511). Springer, Cham.
2. Shevchenko, V. V., Kapinos, I. V., & Hrabovskiy, D. O. (2011). Systema diahnostyky rizalnoho instrumentu dlia obrobky detalei na verstatakh z ChPK. *Problemy lehkoi ta tekstylnoi promyslovosti Ukrainy*, 1, 193–216.
3. Ostafiev, V. A., Tymchik, H. S., & Shevchenko, V. V. (1983). *Adaptyvna systema upravlinnia. Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia kontroliu* (s. 8–25). Kyiv.
4. Prots, Ya. I., Savkiv, V. B., Shkodzinskyi, O. K., & Liashchuk, O. L. (2011). *Avtomatyzatsiia vyrobnychkh protsesiv: Pidruchnyk dlia tekhnichnykh spetsialnostei vyshchikh navchalnykh zakladiv* (344 s.). Ternopil: TNTU im. I. Puluiia.
5. Oduola, O. M., Ikutehbe, K. A., & Akinluwade, K. (2016). *Materialy rizalnykh instrumentiv ta mekhanizmy znoshuvannia pry obrobtsi metaliv: Viazkist, hariacha tverdist ta znosostiikist yak osnovni vlastyvyosti materialiv rizalnykh instrumentiv u vyrobnytstvi* (68 s.). LAP LAMBERT Academic Publishing.
6. *Avtomatyzatsiia vyrobnytstva: mekhanika rizannia metaliv, vibratsii verstativ ta proektuvannia ChPK* (2-he vyd.) (2012). Kembrydzh.
7. Sharma, V. S., Sharma, S. K., & Sharma, A. K. (2007). Otsinka znoshuvannia rizalnoho instrumentu pry tochinii. *Zhurnal intelektualnoho vyrobnytstva*, 19, 89–118.
8. Hroshe, P., & Nitshe, H. (2007). Vplyv temperatury na initsiatsiiu adheziinoho znoshuvannia shchodo hlybokoho vytiahuvannia aliuminiievykh splaviv. *Zhurnal tekhnologii obrobky materialiv*, 191(1–3), 314–316.
9. Matviienko, S., Shevchenko, V., Tereshchenko, M., Kravchenko, A., & Ivanenko, R. (2020). Vyznachennia skladu na osnovi teploprovodnosti metodom priamoho nahrivu termistora. *Skhidno-Yevropeiskiy zhurnal peredovykh tekhnologii*, 9–39.

-
10. Tsapenko, V., Tereshchenko, M., Tymchyk, H., Matviienko, S., & Shevchenko, V. (2020). Analiz dynamichnoho navantazhennia na stopu liudyny. U 2020 IEEE 40-a Mizhnarodna konferentsiia z elektroniky ta nanotekhnologii (ELNANO) (s. 400–404). Kyiv, Ukraina.
 11. Nortrop, H. R., Chek, D. Zh., & Ulmann, H. V. (2009). Akustychnyi kontrol materialiv (s. 35–40). Kyiv: Vydavnytstvo «Tekhnika».
 12. Suslikov, L. M., & Studeniak, I. P. (2016). Metody neruinivnoho kontroliu: Pidruchnyk (s. 92–107). Uzhhorod: Vydavnytstvo UzhNU.