

## ДІАГНОСТИКА І ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОСУ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА ПРИБРОБЦІ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

© Бринюк М.С., Кондратюк О.Л., Марков В.О., Скоркін А.О.

*Українська інженерно-педагогічна академія*

### Інформація про авторів:

**Бринюк Максим Сергійович (Bryniuk Maksym):** ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-2974-8818>; e-mail: Maksimysimi@gmail.com, аспірант кафедри машинобудування, транспорту і зварювання, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Кондратюк Олег Леонідович (Kondratyuk Oleh):** ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3263-0483>; e-mail: kondratyuk.mot@gmail.com, кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри машинобудування, транспорту і зварювання, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Марков Владлен Олегович (Markov Vladlen):** ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0625-6934>; e-mail: marik.markov.1997@gmail.com, аспірант кафедри машинобудування, транспорту і зварювання, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Скоркін Антон Олегович (Skorkin Anton):** ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3032-83414>; e-mail: Antonskorkin20@gmail.com, кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри машинобудування, транспорту і зварювання, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті розглядається один із варіантів вирішення однієї з найважливіших проблем обробки матеріалів різанням – прогнозування ресурсу різального лезового інструменту та розробки на цій основі нового методу діагностування його технічного стану, що й запобігло актуальності представленого у статті матеріалу. При цьому під ресурсом розуміється період стійкості інструменту між переточуванням, тому що тривалість експлуатації інструменту, що не вимагає переточування, найбільш просто піддається автоматичному контролю.

Метою досліджень, результати яких викладені в цій статті, є створення методу прогнозування ресурсу різального інструменту, що ґрунтується на безперервному контролі в процесі різання величини тиску звуку, що супроводжує обробку різанням.

У процесі досліджень було використано методи: системного аналізу, теорії різання, теорії коливань та ідентифікації, що виконується методом випадкового пошуку. Розглянуто динамічну поведінку металообробної технологічної системи при зношуванні ріжучого інструменту.

В результаті проведених досліджень розроблено метод прогнозування ресурсу ріжучого інструменту, що ґрунтується на ідентифікації параметрів прогнозної моделі за результатами безперервного контролю сигналів віброакустичної емісії (BAE) за величиною, що супроводжує процес різання. Причому модель складена таким чином, що шуканий ресурс включений до її математичної структури, що дозволяє виключити використання під час прогнозування статистично ненадійних критеріальних параметрів, що описують граничний стан інструменту.

Розроблено модель прогнозування технічного стану технологічної системи, що дозволяє оцінювати ресурс як інструменту, і технологічної системи загалом. Знання ресурсу технологічної системи забезпечує перехід до адаптивного управління її функціонуванням і виключає цим непередбачені зупинки заміну інструменту, ремонт верстата і зводить до мінімуму ризик появи браку обробленої деталі. Розроблений автоматизований прогнозно-діагностичний комплекс забезпечує використання запропонованої прогнозної моделі у практику обробки широкого кола матеріалів, що у результаті вирішує важливе науково-практичне завдання підвищення ефективності процесу різання.

**Ключові слова:** технологічна система, контроль, діагностування, якість виготовлення, модель прогнозування, ресурс інструменту, ефективність процесу різання.

*Bryniuk M., Kondratyuk O., Markov V., Skorkin A.* “Diagnostics and predictive analysis of the wear of a cutting tool when processing on CNC machines”

This article addresses a significant issue in material processing, specifically the forecasting of cutting blade tool resources and the development of a novel method to diagnose the criticality of its technical condition. The concept of resource refers to the period of the tool wear before resharpening, since the duration of the tool operation, which does not require resharpening, is the easiest to control automatically.

This article presents the outcomes of research aimed at developing a method for forecasting the resource of a cutting tool by continuously monitoring the sound pressure level during the cutting process.

The investigation employed system analysis, cutting theory, oscillation theory, and identification methods through random search. The study focused on analyzing the dynamic behavior of the metalworking technological system as the cutting tool undergoes wear.

The research resulted in the development of a forecasting method for the cutting tool resource. This method involves identifying parameters of a forecast model based on continuous monitoring of the sound pressure level during the cutting process. Moreover, the model is compiled in such a way that the sought-after resource is included in its mathematical structure, eliminating the need for statistically unreliable criteria parameters when making forecasts about the limit state of the tool.

This article presents a novel model for forecasting the technical state of technological systems, enabling estimation of the resource of both the tool and the technological system as a whole. Knowledge of the system resource facilitates the implementation of adaptive management, preventing unforeseen interruptions for tool replacement or machine repair, and minimizing the risk of workpiece omissions. The developed automated predictive and diagnostic complex facilitates the practical application of the proposed forecasting model across a wide range of material processing scenarios. This advancement addresses a crucial scientific and practical objective of enhancing cutting process efficiency.

**Keywords:** technological system, control, diagnostics, manufacturing quality, prediction model, tool resource, efficiency of the cutting process.

### **Вступ**

Одна з головних причин зниження точності обробки на металорізальних верстатах – зміна розмірів різального інструменту внаслідок його зношування. Актуальність завдання підвищується при обробці матеріалів, що важко обробляються (корозійно-стійкий жароміцний сплав ХН73МБТЮ), які широко використовуються в авіаційній промисловості та енергетичному машинобудуванні, оскільки для важкооброблюваних матеріалів трудомісткість обробки заготовки можна порівняти з ресурсом інструменту. Зупинка процесу через знос інструменту часто означає брак дорогої деталі. Контроль стану та заміна інструменту в реальних виробничих умовах здійснюється на основі розрахункової стійкості. Але залежно від якості інструменту, варіація стійкості інструменту в одній партії коливається від 15 до 35%. Якщо час роботи інструменту визначається найгіршим зразком у партії, то найбільш стійкі зразки при фіксованому напрацюванні використовують свій ресурс лише на 65%.

Без інформації про інтенсивність зношування інструменту неможлива оптимізація процесів різання (ПР), процедура вибору оптимальних умов обробки тощо.

Незважаючи на тривалі дослідження, що проводяться у зазначеному напрямку проблема створення системи оперативної діагностики стану ріжучого інструменту (PI) залишається невирішеною.

Розвиток засобів діагностики дозволить:

- підвищити точність механообробки за рахунок корекції траєкторії інструменту з урахуванням поточного значення зносу;
- вести оптимальне керування за критерієм зношування інструменту.

Пропоноване дослідження присвячене актуальним питанням підвищення достовірності оцінки розмірного зносу ріжучого інструменту системою моніторингу, розробці методики прогнозування параметрів, що характеризують стан різального інструменту.

### **Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

При різанні робочі поверхні різального інструменту піддаються дії різного роду впливу, а саме фізико-механічного та хімічного, що зменшує ефективність різального інструменту через деформацію, зношення та несправності інструменту. Постійне зношення інструменту сприяє погіршенню його конструктивних параметрів та в загальному зменшує ефективність, внаслідок чого якість і точність механічної обробки знижується, а процент браку лише збільшується, від чого зменшується продуктивність виробництва. Внаслідок чого виробництво стає збитковим та не виправдовує вкладені в нього ресурси та сили [2].

Для того щоб уникнути цих проблем, необхідно використовувати системи діагностики різального інструменту на верстатах з ЧПК, що дасть можливість вчасно змінювати ріжучий інструмент ще до того як він неочікувано вийде з ладу та зіпсує деталь. Система діагностики дозволить проводити контроль стану різального інструменту в режимі реального часу, а також знизить ймовірність неправильної оцінки працездатності різального інструменту і невірних дій системи автоматизованого контролю процесу обробки. А також система діагностики повинна мати можливість використання в умовах автоматизованого виробництва без серйозних конструктивних змін технологічно-оброблювальних систем (ТОС) [3].

Розроблений програмний комплекс, заснований на методах та алгоритмах обробки сигналу та теорії вейвлет-перетворень, дозволить впровадити у виробництво запропоновані методи моніторингу та прогнозу зносу РІ. Підвищити точність та достовірність оцінки зносу різального інструменту шляхом синтезу методів контролю за електричними та віброакустичними сигналами, що підвищить ефективність та надійність усієї технологічної системи верстата. А оцінка ресурсу конкретного РІ в реальному часі дозволить практично реалізувати оптимальне і ситуаційне керування процесом механообробки [8-13].

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Ключовими елементами технологічної системи є різальний інструмент та заготовка – майбутня деталь, заради якої, власне, і створюється металообробна технологічна система. Ці два елементи забезпечують «динамічну замкнутість» технологічної системи та кардинально впливають зміну її динамічної поведінки, оскільки характеристики заготовки та інструменту у процесі функціонування системи безперервно змінюються.

Слід зазначити, що дослідження динамічної поведінки технологічних систем проводяться давно і мають велику бібліографію. Це насамперед роботи, виконані під керівництвом І.С. Амосова, А.І. Бетанелі, Н.А. Дроздова, І.І. Ільницького, А.І. Каширіна, В.В. Камінської, В.А. Кудінова, Л.К. Кучми, Т.М. Лоладзе, Л.С. Мурашкін, В.А. Остаф'єва, М.Ф. Полетика, Д.М. Решетова, А.П. Соколовського, Г.Л. Хаєта, М.Є. Ельясберга, і навіть дослідження зарубіжних учених – J. Chen, J Black, J Chen. L.A. Chi, D. Dornfield, S. Choudhury, V. K Jain, Rama Rao Ch та інших [5-9].

Працями таких вчених як, В.О Румбешта, А.П. Рыбалко, В.Л. Заковоротний, В.Ц. Зориктуєв, В.І. Подураєв, Г.Б. Лурье, О.В. Кретінін, Ю.Г. Кабалдін, А.Д. Макаров, Є.М. Трент та ін., розроблені методи контролю динамічної поведінки технологічних систем на основі супроводжуваних їх роботу різноманітних за фізичною природою інформаційних сигналів: акустичної емісії, вібрації, компонентів сил різання, електричних параметрів та ін [1-4].

Значний внесок у цю проблематику роблять і вітчизняні українські вчені та дослідники: Ю.М. Внуков та В.А. Залого (вплив процесів, які у робочій зоні обробних

систем, з їхньої динаміку); А.П. Зінківський та Г.В. Цибанів (вібраційні та втомні процеси, що супроводжують роботу різноманітних машин та механізмів); В.А. Марцинковський та В.І. Симоновський (динамічна поведінка різноманітного промислового обладнання, у тому числі верстатів з ЧПК та автоматичних ліній) [1, 2].

Однак, незважаючи на значний обсяг подібних робіт, що вивчають різні аспекти динаміки машин, у тому числі й обробних систем, багато теоретичних та практичних проблем оперативного контролю їх динамічної поведінки та визначення на цій основі їх ресурсу, не знайшли ще однозначного рішення.

Так, серйозним обмеженням проведених досліджень є те що, що прийняті методи контролю спрямовані фіксацію поточного стану обробної системи, не враховує передісторію її динамічної поведінки у технологічних умовах її роботи. Отримувані при цьому моделі, що описують поточний стан системи, добре працюють тільки в умовах її роботи, в яких і проводилися вихідні дослідження. В інших умовах доводиться повністю повторювати експеримент, що часто є неприйнятним для широкого практичного використання запропонованого методу визначення ресурсу в практиці виробництва.

Для вирішення завдань визначення ресурсу традиційно використовуються методи контрольних карт, кореляційний, спектральний аналіз та авторегресії. В останні роки багато уваги приділяється нейронним мережам, факторному та кластерному аналізу сигналів, методам, заснованим на використанні нечітких множин [16, 17]. Разом з тим складність реальних процесів роботи обробної системи, їх нелінійність і аварійність призводять до необхідності розробки нових методів та алгоритмів аналізу даних та визначення ресурсу обробних систем.

Тому, незважаючи на значні успіхи в галузі контролю динамічної поведінки обробних систем, залишається проблема підвищення точності, швидкодії, надійності, простоти технічної реалізації та інваріантності до умов їх роботи.

Аналіз сучасного стану методів моніторингу та прогнозу зносу ріжучого інструменту (РІ) дозволив виділити проблеми та шляхи їх вирішення:

1. Більшість систем моніторингу стану інструмента побудовані за таким принципом: вимірюються кілька параметрів процесу різання, що мають кореляційний зв'язок зі зносом інструменту (такі як складові сили різання, вібрація, сигнали акустичної емісії, потужність приводу головного руху). Виміряні сигнали фільтруються, посилюються, отримують корисні характеристики сигналів (амплітуда, спектр, статистичні оцінки, коефіцієнти хвильового спектру), які надходять на вхід нейронної мережі.

2. Більшість існуючих систем моніторингу не задовольняють вимогам універсальності, розраховані на жорстко запрограмовані режими механічної обробки та вузький номенклатурний ряд матеріалів або мають недостатньо високу достовірність. Виявлено проблему створення бази даних та бази знань, а також розробки алгоритмів автоматичного синтезу моделей на основі експериментальних даних.

В результаті виконаного літературно-патентного аналізу вітчизняних та зарубіжних систем моніторингу визначено найбільш надійні та прості методи контролю, що ґрунтуються на аналізі сигналів віброакустичної емісії (ВАЕ) та сигналів електропровідності контакту «інструмент-деталь» (ЕП КІД). Виявлено проблеми, пов'язані з підвищенням чутливості та достовірності методу контролю на основі сигналу ВАЕ та необхідності адаптації моделей ПР, що використовуються для моніторингу та діагностики – для методів контролю на основі ЕП КІД. [5, 6, 12,13]

Висунуто гіпотезу про можливість підвищення швидкодії та точності системи моніторингу шляхом синтезу методів контролю працездатності ріжучого інструменту, що ґрунтуються на вимірі віброакустичної емісії та електропровідності контакту «інструмент-деталь». На першому етапі аналізується сигнал віброакустичної емісії, інваріантний до режимів обробки, і вибирається структура моделі зносу. На другому кроці проводиться

оцінка ступеня зносу РІ з урахуванням аналізу сигналу електропровідності контакту "інструмент-деталь" [12].

Огляд існуючих систем прогнозу зносу РІ показав, що існують два принципово різні підходи до завдання прогнозу:

- ітераційний (прямий) прогноз

$$x_n = f(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_{n-D}, c), \quad (1)$$

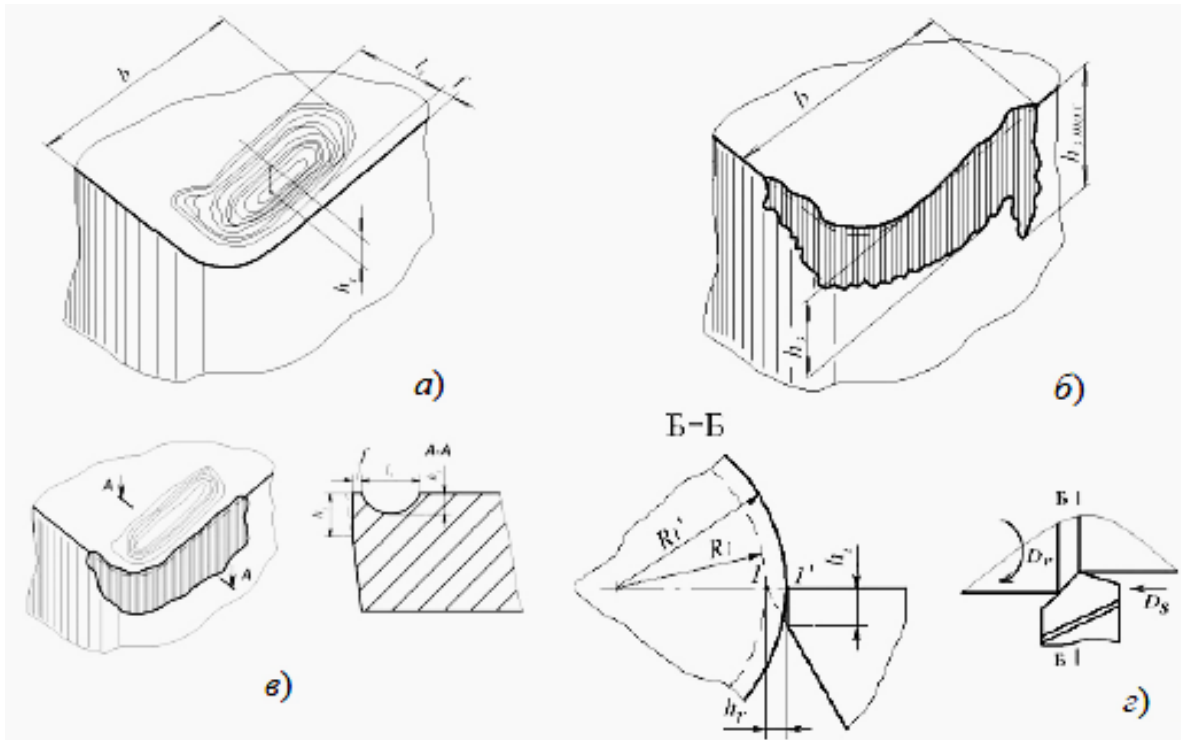
де  $x$  – параметр, що спостерігається;  $c$  – константа.

- модельні відображення

$$f(t, c) = c_1 \phi_1(t) + \dots + c_p \phi_p(t), \quad (2)$$

де  $\phi_1$  – базова функція.

У першому випадку (1) процес різання (ПР) розглядається як стаціонарний і не враховує нелінійний характер функціональної залежності зносу інструменту від часу в процесі різання (рисунок 1), характерний для обробки матеріалів, що важко обробляються.



**Рис. 1** – Зношування різця по передній (а), задній (б) поверхні; збалансований знос різця (в); радіальний знос різця (г)

У другому (2) методі, заснованому на використанні раніше отриманої моделі, не враховується змінність факторів зовнішнього середовища та змінність внутрішніх параметрів системи. На підставі проведеного аналізу сформульовані такі вимоги до методу прогнозу стану РІ:

- враховувати апріорну інформацію про модель поведінки об'єкта діагностики через структуру моделі, що зберігається у базі даних;
- кількісну оцінку здійснювати з урахуванням оперативної інформації, отриманої від датчиків.

**Метою роботи є** вдосконалення методів моніторингу зносу різального інструменту та прогнозу діагностичних параметрів процесу різання.

### Виклад основного матеріалу

На основі аналізу об'єкта діагностики, методів контролю стану інструменту та існуючих ефективних виробничих рішень розроблено функціональну схему системи оперативної діагностики стану різального інструменту (рисунок 2). Проведено обґрунтований вибір та реалізація методів контролю на основі електричних та віброакустичних параметрів [12]. Розроблено методики зниження розмірності та отримання інформативних ознак сигналів, реалізовані в програмно-математичному забезпеченні та апробовані в натурних експериментах.

Проаналізовано особливості фізичного формування сигналів термоЕДС, ЕП КІД (рисунок 3) та ВАЕ (рисунок 4), прийняті раніше як основні діагностичні параметри. Відзначено особливості вимірювання термоЕДС для різців з механічним кріпленням ріжучої пластини, для яких запропоновано методику уточненого розрахунку величини термоЕДС, що полягає у компенсації паразитної складової в процесі оперативного вимірювання. Для вибраних методів контролю розрахований динамічний діапазон, швидкодія, точність датчиків та сформульовані вимоги до АЦП. Доопрацьовано пристрій вимірювання ЕП КІД, що відрізняється від аналогів: можливістю одночасної реєстрації термоЕДС, постійною та змінною складовою ЕП КІД; цифровою реєстрацією контрольованих параметрів; високою частотою (до 400 кГц) та точністю ( $\pm 0,01$  мВ).

Вимірювання ЕП КІД  $G_{КІД}$  (рисунок 3) проводиться за методом, запропонованим у роботах професора Зориктуєва В.Ц., і визначається за такою формулою:

$$G_{КІД} = \frac{1}{R_{КІД}} = \frac{I_E}{U-E} \quad (3)$$

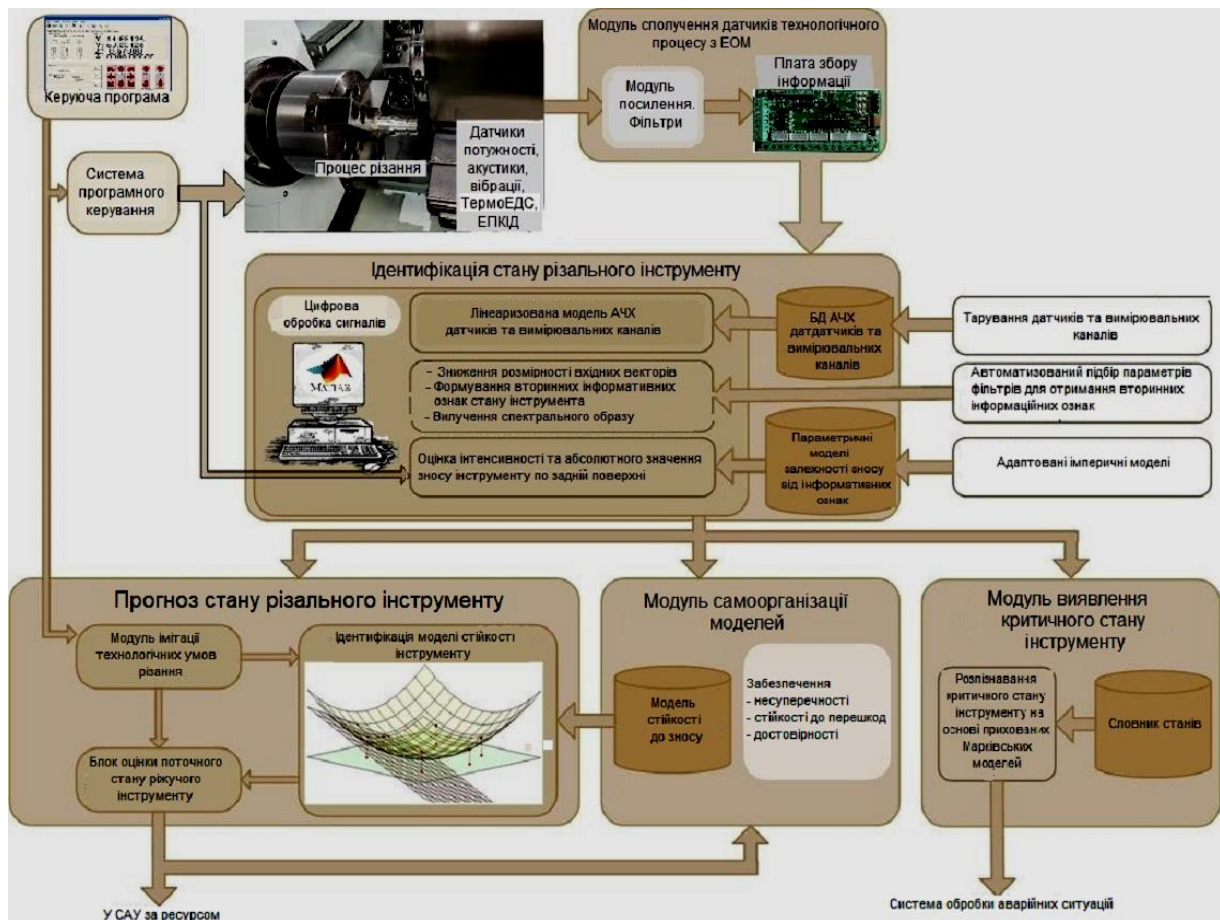


Рис. 2 – Функціональна схема системи оперативної діагностики стану різального інструменту



На контакт "інструмент-деталь" підводиться постійний струм еталонної амплітуди  $I_E$ . Після затримки часу  $\tau$ , обумовленого часом перехідного процесу в ланцюзі СПД, проводиться вимірювання повної напруги  $U$ , яке складається з суми двох складових: напруги індукованого струмом пропусає  $I_E R_{кід}$  і термоЕДС  $E$ . Опір контакту залежить від форми контакту, який змінюється в процесі зносу інструменту.

Дослідження методів аналізу сигналу ВАЕ на основі Фур'є та вейвлет-перетворень, теоретично та експериментально доведено ефективність застосування останнього для вирішення проблеми невизначеності частотного та тимчасового вирішення [19, 21, 26]. Запропоновано метод зниження розмірності сигналу на основі вейвлет-перетворень без зниження його інформативності, що полягає в оцінці середньої енергії  $E_j$  значень вейвлет-коефіцієнтів деталізації  $j$ -го рівня (4):

$$E_j = \frac{1}{T_j} \sum_{k=1}^{T_j} d_j^2(k), \quad (4)$$

де  $T_j$  – число коефіцієнтів у кожній шкалі по-різному, оскільки часові інтервали хвилювих коефіцієнтів змінюються пропорційно  $j$ ;  $j$  – рівень розкладання;  $d_j$  - коефіцієнт деталізації  $j$ -рівня вейвлет-розкладання:

$$d_{j-1,k} = (f, \psi_{j-1,k}) = \int_R f(x) \psi_{j-1,k}(x) dx \quad (5)$$

де  $\psi(x)$  - аналізуючий вейвлет.

Встановлено, що інформативним параметром, що характеризує знос РІ є дисперсія деталізуючих коефіцієнтів вейвлет-розкладання сигналу ВАЕ (рисунок 5, а), даний параметр є нечутливим до змін режимів обробки. Для вейвлет-аналізу ефективно застосування найпростішого базису – вейвлет Хаара. Мінімальна тривалість аналізованої вибірки становить 0,1 с. Ідентифікація зношування РІ здійснюється за значенням енергії деталізуючих коефіцієнтів  $j$ -го порядку. Для розкладання у базисі вейвлета Хаара  $3 < j < 6$ .

Енергетичний спектр апроксимуючих коефіцієнтів є чутливим до поломок та переривань ПР (рисунок 5, б).

Встановлено, що для розпізнавання нейронною мережею LVQ (learning vector quantization) двох станів інструменту, що відповідають гострому ( $h_3 < 0,2$  мм) та зношеному ( $h_3 > 0,4$  мм), достатньо навчання на мінімальному обсязі експериментальних даних (один тестовий прохід).

Результат розпізнавання інваріантний для зміни режимів обробки в широких межах.

Для розпізнавання стану інструмента з точністю  $\pm 0,1$  мм потрібно більший обсяг експериментальних даних, підвищення потужності мережі та введення додаткових вхідних координат, що відповідають режимам обробки. Однак у цьому випадку достовірність результату розпізнавання з урахуванням архітектури досягає 75%. Причина невисокої ефективності НС при розпізнаванні зносу РІ з високою точністю полягає в тому, що різні стани РІ здатні породжувати один і той же миттєвий енергетичний вейвлет-спектр віброакустичних коливань.

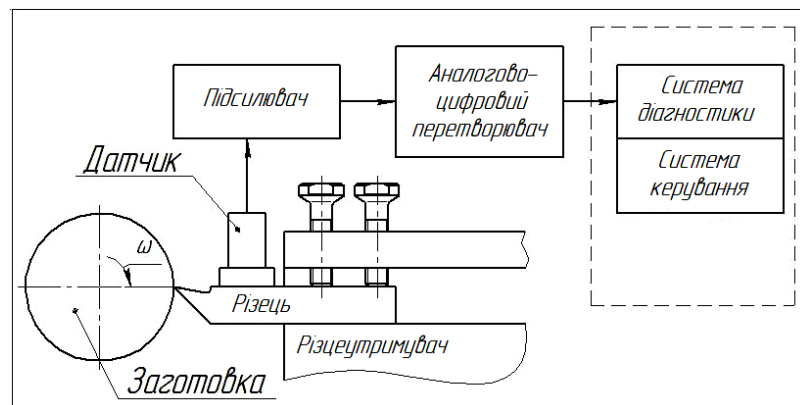
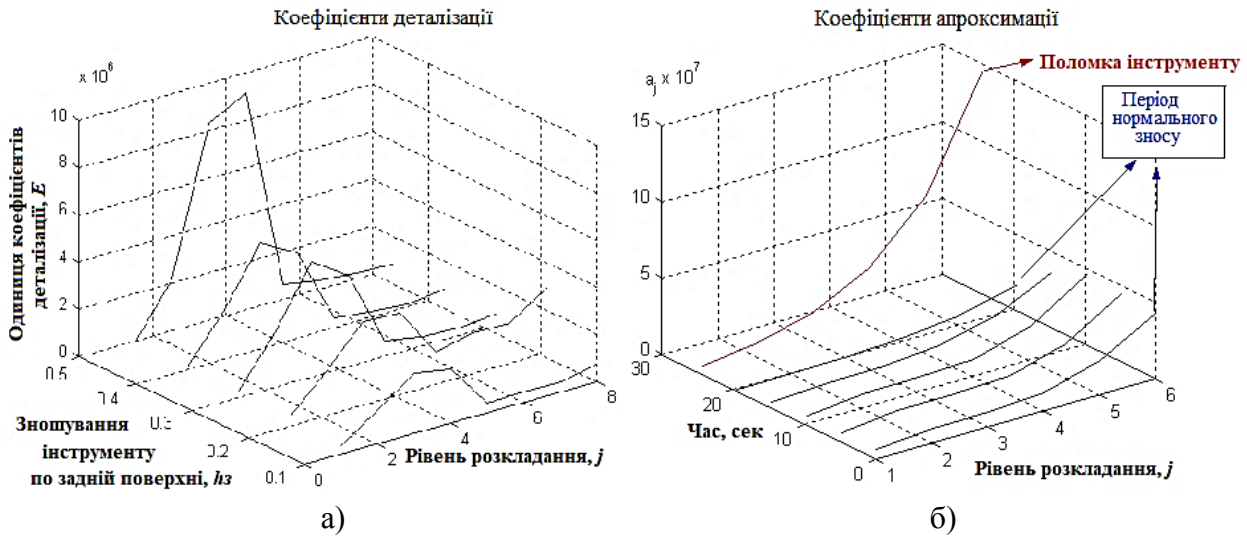
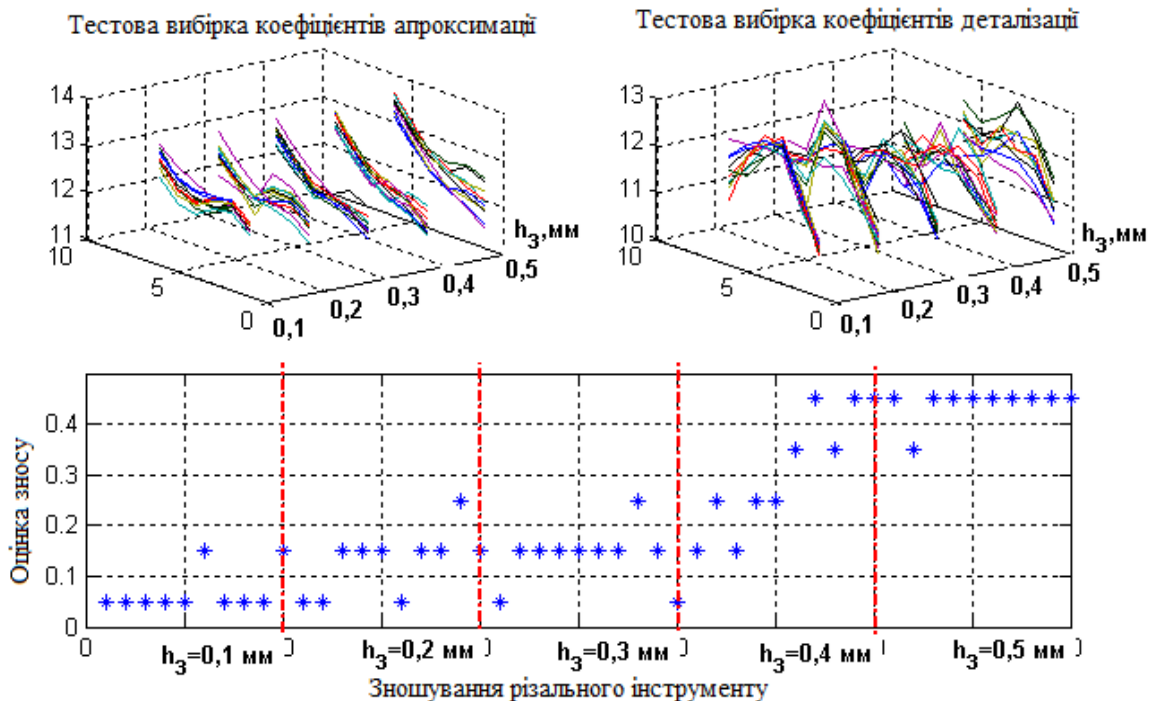


Рис. 4 – Схема виміру сигналу віброакустичної емісії



**Рис. 5** – Коефіцієнти розкладання сигналу ВАЕ в базисі вейвлета Хаара, отримані при поздовжньому точенні ВК8 ( $V = 40$  м/хв;  $s = 0,075$  м/об;  $t = 0,5$  мм):  
а – деталізуючі; б – апроксимуючі

З метою підвищення точності та достовірності оцінки стану РІ розроблено та отримав експериментальне підтвердження (рисунок б) алгоритм ідентифікації моделі зносу РІ, що полягає у знаходженні точки завершення процесу приробітку РІ за сигналом ЕП КІД, та зносу інструменту  $h_{кр}$  за сигналом ВАЕ НС на пробному проході з наступним розрахунком рівняння лінійної функції  $h_3 = f(G^*_{СП})$ . Відносна електропровідність  $G^*$  має практично



**Рис. 6** – Результат розпізнавання стану РІ при обробці ВК60М, НС при  $V = 37 \div 48$  м/хв,  $dV/dt > 0$ ,  $s = 0,9$  мм/об навчену при  $V = 25 \div 41$  м/хв,  $dV/dt > 0$ ,  $s = 0,125$ ;  $V = 37 \div 48$  м/хв,  $dV/dt < 0$ ,  $s = 0,125$  мм/об



лінійну залежність від зносу інструменту і практично інваріантна до величини термоЕДС, швидкості та глибини різання.

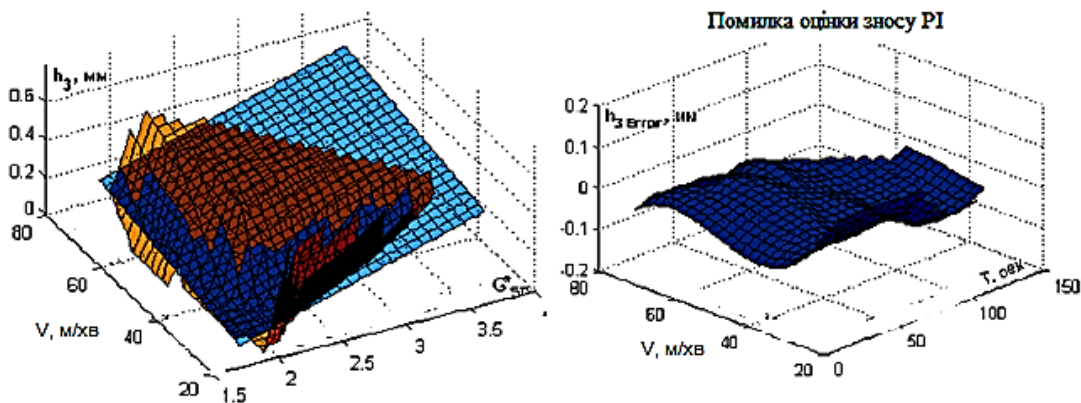
$$G_{ST}^* = \frac{G_{S0}}{G_{ST}}, \quad (6)$$

де  $G^*S_n$  - відносна електропровідність, визначається з наступного відношення;  $G_{S0}$  - електропровідність КІД при робочій подачі;  $G_{ST}$ -ЕП КІД при зниженій подачі  $s_n = 0,07$  мм/об.

Алгоритм оцінки зносу на основі отриманої моделі забезпечив точність розпізнавання 0,05 мм на ділянці нормального зносу РІ та відрізняється від аналогів здатністю до адаптації та самонавчання в процесі механообробки.

Для зберігання аналізу існуючих та новостворених моделей, на основі яких виконується ідентифікація поточного стану РІ та прогноз працездатності та діагностичних параметрів процесу різання, використовується база даних (БД) та база знань (БЗ). Структура бази даних відповідає вимогам ієрархічності і передбачає такі поля:

- марку оброблюваного матеріалу та інструменту;
- вихідний параметр ( $E$  - термоЕДС;  $G$  - ЕП КІД);
- вхідні (варіюються) параметри, що кодуються символами  $x_1, x_2 \dots x_n$ , та інтервали їх варіювання ( $x_1 \rightarrow V(30-50$  м/хв) швидкість різання;  $x_2 \rightarrow S(0,097-0,39$  мм/об) - подача інструменту;  $x_3 \rightarrow t(0,5-1,5$  мм) - глибина різання;  $x_4 \rightarrow h_3(0,1-0,4$  мм) - зношення інструменту по задній поверхні;
- постійні відомі параметри, що не змінюються або змінюються незначно у процесі обробки з присвоєними їм значеннями (кут у плані, передній, задній кут);
- вид обробки, характеристики інструменту (різець цільний, з напайними пластинами, з механічним кріпленням ріжучої пластини), тип устаткування, що використовується, особливості обробки (ЗОТС, без ЗОТС).



**Рис. 7** – Експериментальна та розрахункова поверхні функції  $h_3 = f(V, G^*S_i)$  та функція помилки  $\Delta = f(V, T)$  для для оброблюваного матеріалу ХН73МБТЮ інструментом з ВК8

Відмінна особливість БД полягає у векторно-матричному представленні параметрів. Таким чином, як вихідний параметр може бути використаний вектор стану (наприклад  $[cD_1, \dots, cD_6, cA_1, \dots, cA_6]$  – деталізуючих та апроксимуючих коефіцієнтів вейвлет-розкладання (див. табл.1)).

Наприклад, якщо знайдено параметричну залежність термоЕДС  $E$  від швидкості різання  $V$ , подачі інструменту  $S$ , глибини різання  $t$  і зносу інструменту по задній поверхні  $h_3$  і, знайдена закономірна залежність, що однозначно зв'язує температуру з термоЕДС, то формується функціональна залежність, що зв'язує температуру РІ зі швидкістю, глибиною та зносом РІ.

Таблиця 1 – Приклад процедурних знань збережених у основі правил

1	$E = f(V, S, t, h_3)$	&	$Q = f(E)$	→	$Q = f(V, S, t, h_3)$
2	$E = f(V, S, t, h_3)$	&	$E = f(Q)$	→	$E = f(V, S, t, h_3)$
3	$G = f(V, S, t, L)$	&	$h_3 = f(L)$	→	$G = f(V, S, t, h_3)$
	...				

Статистичний аналіз результатів експерименту показав (рис. 8), що для найгіршого випадку, коли модель зносу РІ відсутня, точність прогнозу ресурсу, що залишився, після завершення процесу приробітку підвищується з 66% (1,3 мм) (за статистичними моделями) до 89% (0,6 мм); точність прогнозу настання критичного зносу РІ з 74% (65 сек) до 88% (11 сек). Якщо прецедент поєднання технологічних параметрів для цієї пари матеріалу та інструменту є в базі даних, точність прогнозу зростає.

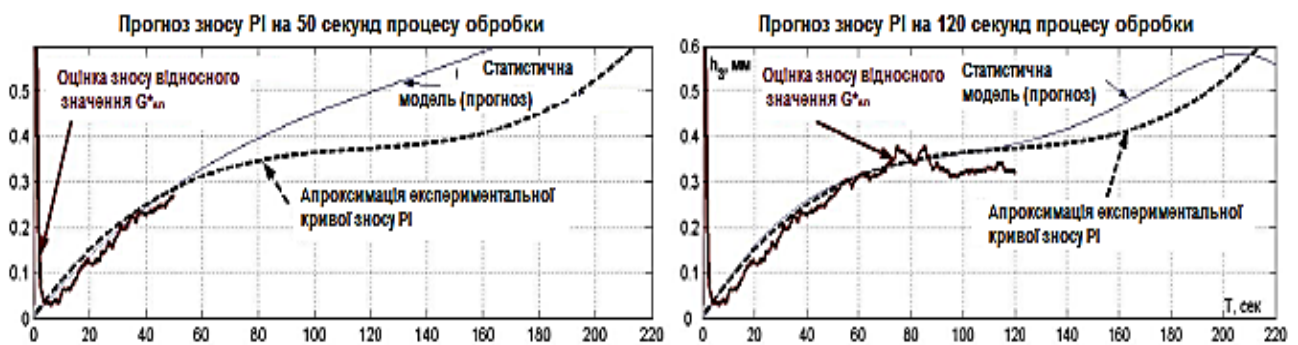


Рис. 8 – Прогноз зносу РІ

## Висновки

У роботі на прикладі технологічної металообробної системи вирішено важливе науково-технічне завдання визначення фактичного ресурсу механічної системи за результатами оперативного контролю тренду інформаційного сигналу, що супроводжує її роботу та відображає індивідуальні особливості динамічної поведінки системи протягом контрольованого терміну її експлуатації та наступної параметричної ідентифікації на основі цієї інформації прогнозу моделі, числові значення одних з коефіцієнтів якої дорівнюють напрацюванню даної системи до її відмови.

1. Удосконалено методику ідентифікації зносу РІ за сигналом віброакустичної емісії шляхом оцінки енергії спектра деталізуючих коефіцієнтів вейвлет-перетворення. Удосконалення методики підвищило інваріантність оцінки зносу до режимів механообробки.

2. Розроблено методику корекції моделі зносу РІ щодо відносної електропровідності контакту «інструмент-деталь». У ідентифікації моменту настання катастрофічного зносу РІ по енергетичному спектру деталізуючих коефіцієнтів вейвлет-перетворення сигналу ВАЕ, лінійної інтерполяції функції  $h_3(t)$  в зоні нормального зносу та корекції моделі на основі даної інформації. Синтез методів контролю на основі електричних та віброакустичних сигналів дозволив підвищити точність та забезпечити універсальність оцінки поточного зносу РІ.

3. Розроблено алгоритм прогнозування діагностичних параметрів процесу різання та зносу РІ, на основі наявних апріорних та емпіричних даних, який враховує нелінійність функції зносу РІ у часі та варіацію стійкості інструментів у партії. Алгоритм полягає в корекції оцінки базової моделі, за результатами поточних вимірювань, шляхом додавання адитивної складової отриманої на основі екстраполяції функції нев'язки, що дозволяє знизити витрати на інструментальний матеріал; провести оцінку ресурсу інструменту, що залишився, перед початком обробки нової заготовки; ввести оптимальне керування станом різального інструменту.

**Список використаних джерел:**

1. Залого В. О. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів: навчальний посібник / В. О. Залого, Ю. М. Внуків. – Суми : Сумський державний університет, 2010. – 243 с.
2. Залого В. А. Дослідження можливості застосування методу діагностики акустичної емісії в чистове точіння титанового сплаву / В. А. Залого, Р. Н. Зінченко // *Весник КумДУ. Серія Технічні науки*. – 2008. – № 4. – С. 118-125.
3. Румбешта В. О. Системи керування якістю виготовлення виробів : курс лекцій / В. О. Румбешта. – НТУУ «КПІ», 2000. – 85 с.
4. Рыбалко А. П. Системы технологической диагностики и адаптивного управления для станков с ЧПУ / А. П. Рыбалко, Н. В. Лищенко, В. П. Ларшин. // *Високі технології в машинобудуванні*. – 2015. – № 1. – С. 150–161.
5. Barton J. Tool - wear monitoring by optical techniques / J. Barton, B. Reuben // *Materials World*. – 1996. – № 4 (3). – P. 131–132.
6. Chen J. C. A fuzzy-nets in-process (FNIP) system for tool-breakage monitoring in end-milling operations / J. C. Chen, J. T. Black // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1997. – Iss. 37 (6). – P. 783–800.
7. Chen J. C. A tool breakage Detection system using an Accelerometer sensor / J. C. Chen, W. L. Chen // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 1999. – № 10. – P. 187-197.
8. Chi L. A. A self-organizing approach to the detection and prediction of tool wear / L. A. Chi, D. A. Dornfield // *ISA Transactions*. – 1998. – № 37. – P. 239-255.
9. Choudhury S. K. On-line monitoring of tool wear in turning using a neural network / Choudhury S. K., Jain V. K., Rama Rao Ch. V. V. // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1999. – № 39. – P. 489-504.
10. Dimla D. E. Application of perceptron neural networks to tool state classification in a metal-turning operation / D. E. Dimla // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 1999. – № 12. – P. 471-477.
11. Govekar E. Analysis of acoustic emission signals and monitoring of machining processes / Govekar E., Gradisek J., Grabec I. // *Ultrasonics*. – 2000. – № 38. – P. 598-603.
12. Huang P. T. Fuzzy logic-base tool breakage detecting system in end milling operations / Huang P. T., Chen J. C. // *Computers and Industrial Engineering*. – 1998. – № 35 (1-2). – P. 37-40.
13. Li X. A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning / X. Li // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2002. – № 42. – P. 157-165.
14. Li X. Current-sensor-based feed cutting force intelligent estimation and tool wear conditioning monitoring / Li X., Djordjevich A., Venuvinod P. K. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2000. – Iss. 47(3). – Pp. 697-702.
15. Detection of acoustic emission in cutting processes by fibre optic interferometry / McBride R., Carolan T. A., Barton J. S., Wilcox S. J., Borthwick W. K. D., Jones J. D. C. // *Measurement Science and Technology*. – 1993. – Iss. 4(10). – P. 1122-1128.
16. Owsley L. M. Self-Organizing Feature Maps and Hidden Markov Models for Machine-Tool Monitoring / Owsley L. M., Atlas L. E., Bernard G. D. // *IEEE Transactions on Signals Processing*. – 1997. – № 45 (11). – P. 2787-2798.
17. Atlas L. Hidden Markov Models for Machining Tool-Wear / Atlas L., Ostendorf M., Bernard G. D. // *IEEE*. – 2000. – P. 3887-3890.
18. Quan Y. On-line robust identification of tool-wear via multi-sensor neural-network fusion / Quan Y., Zhou M., Luo Z. // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 1998. – Iss. 11. – P. 717-722.
19. Saglam H. Tool Condition Monitoring in Milling based on Cutting Forces by a Neural Network / H. Saglam, A. Unuvar // *International Journal of Production Research*. – 2003. № 41 (7). – P. 1519-1532.
20. Sick B. Fusion of hard and soft computing techniques in indirect, online tool wear monitoring / B. Sick // *IEEE Transactions of Systems, Man, and Cybernetics*. – 2002. – № 32 (2). – P. 80-91.
21. Dey S. A Bayesian Network Approach to Root Cause Diagnosis of Process Variations / S. Dey, J. A. Stori // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2004. – Iss. 45. – P. 75-91.
22. Haber R. E. Intelligent Process Supervision for Predicting Tool Wear in Machining Processes / R. E. Haber, A. Alique // *Mechatronics*. – 2003/ – Iss. 13. – P. 825–849.
23. Young H. T. Cutting temperature responses to flank wear / H. T. Young // *Wear*. 1996. – T. 201. – P. 117–120.
24. Tool-wear Monitoring based on Continuous Hidden Markov Models / Vallejo A. J., Nolzco-Flores J. A., Morales-Menéndez R., Sucar L. E., Rodríguez C. A. // *LNCS*. – 2005. – no 3773. – P. 880–890.
25. Diagnosis of a Cutting Tool in a Machining Center / Vallejo A. J., Nolzco-Flores J. A., Morales-Menéndez R., Sucar L. E., Rodríguez C. A. // *IEEE International Joint Conference on Neural Networks*. – 2006. – P. 7097–7101.
26. Pattern Recognition Approaches for Diagnosis of Cutting Tool Wear Condition / Vallejo A. J., Morales-Menéndez R., Garza-Castañón L. E., Alique J. R. // *Transactions of the North American Manufacturing of Research Institution of SME*. – 2007. – T. 35. – P. 81–88.
27. Advance in Swarm and Computational Intelligence / Tan Y. et al // *6th International Conference, ICSI*. – 2015. – Part 3. – P. 115–126.

**References**

1. Zaloga, VO & Vnukov, JM 2010, *Znoshuvannja i stijkist' rizar'nih lezovih instrumentiv, [Wear resistance and cutting blade tools]*, Sums'kij derzhavnij universitet, Sumi.

2. Zaloha, VA & Zinchenko, RN 2008, 'Doslidzhennia mozhyvosti zastosuvannia metodu diahnostryky akustychnoi emisii v chystove tochinna tytanovoho splavu', [*Investigation of the possibility to apply the method of acoustic emission diagnostics in titanium alloy finishing turning*], *Vesnyk KumDU. Seriya Tekhnichni nauky*, no 4, Pp. 118-125.
3. Rumbeshta, VO 2000, *Systemy keruvannia yakistiu vyhotovlennia vyrobiv*, [*Quality management systems for manufacturing products: a course of lectures*], NTUU «KPI», Kiev.
4. Ribalko, AP, Lyshchenko, NV & Larshyn, VP 2015, 'Cystemi tekhnolohycheskoi dyahnostryky y adaptynoho upravleniya dlia stankov s ChPU', [*Process diagnostics and adaptive control systems for CNC machines*], *Vysoki tekhnolohii v mashynobuduvanni*, no 1, Pp. 150-161.
5. Barton, J & Reuben, B 1996, 'Tool - wear monitoring by optical techniques', *Materials World*, no 4 (3), Pp. 131-132.
6. Chen, JC & Black, JT 1997, 'A fuzzy-nets in-process (FNIP) system for tool-breakage monitoring in end-milling operations', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, no 37, Pp. 783-800.
7. Chen, JC, Chen, WL 1999, 'A tool breakage Detection system using an Accelerometer sensor', *Journal of Intelligent Manufacturing*, no 10, Pp. 187-197.
8. Chi, LA & Dornfield, DA 1998, 'A self-organizing approach to the detection and prediction of tool wear', *ISA Transactions*, no 37, Pp. 239-255.
9. Choudhury, SK, Jain, VK & Rama Rao ChVV 1999, 'On-line monitoring of tool wear in turning using a neural network', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, no 39, Pp. 489-504.
10. Dimla, DE 1999, 'Application of perceptron neural networks to tool state classification in a metal-turning operation', *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, no 12, Pp. 471-477.
11. Govekar, E, Gradisek, J & Grabec, I 2000, 'Analysis of acoustic emission signals and monitoring of machining processes', *Ultrasonics*, no 38, Pp. 598-603.
12. Huang, PT & Chen, JC 1998 'Fuzzy logic-base tool breakage detecting system in end milling operations', *Computers and Industrial Engineering*, no 35, Pp. 37-40.
13. Li, X 2002, 'A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, no 42, Pp. 157-165.
14. Li, X, Djordjevich, A & Venuvinod, PK 2000, 'Current-sensor-based feed cutting force intelligent estimation and tool wear conditioning monitoring', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, no 47(3), Pp. 697-702.
15. McBride, R, Carolan, TA, Barton, JS., Wilcox, SJ, Borthwick, WKD & Jones, JDC 1993, 'Detection of acoustic emission in cutting processes by fibre optic interferometry', *Measurement Science and Technology*, no 4(10), Pp. 1122-1128.
16. Owsley, LM., Atlas, LE & Bernard, GD 1997, 'Self-Organizing Feature Maps and Hidden Markov Models for Machine-Tool Monitoring', *IEEE Transactions on Signals Processing*, no 45 (11), P. 2787-2798.
17. Atlas, L, Ostendorf, M & Bernard, GD 2000, 'Hidden Markov Models for Machining Tool-Wear', *IEEE*, Pp. 3887-3890.
18. Quan, Y, Zhou, M & Luo, Z 1998, 'On-line robust identification of tool-wear via multi-sensor neural-network fusion', *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, no 11, Pp. 717-722.
19. Saglam, H & Unuvar, A 2003, 'Tool Condition Monitoring in Milling based on Cutting Forces by a Neural Network', *International Journal of Production Research*, no 41, Pp. 1519-1532.
20. Sick, B 2002, 'Fusion of hard and soft computing techniques in indirect, online tool wear monitoring', *IEEE Transactions of Systems, Man, and Cybernetics*, no 32 (2), Pp. 80-91.
21. Dey, S & Stori, JA 2004, 'A Bayesian Network Approach to Root Cause Diagnosis of Process Variations', *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, no 45, Pp. 75-91.
22. Haber, RE 2003, 'Alique A. Intelligent Process Supervision for Predicting Tool Wear in Machining Processes', *Mechatronics*, no 13, Pp. 825-849.
23. Young, HT 1996, 'Cutting temperature responses to flank wear', *Wear*, T. 201, Pp. 117-120.
24. Vallejo, AJ, Nolzco-Flores, JA, Morales-Menéndez, R, Sucar, LE & Rodríguez, CA 2005, 'Tool-wear Monitoring based on Continuous Hidden Markov Models', *LNCS*, T. 3773, Pp. 880-890.
25. Vallejo, AJ, Nolzco-Flores, JA, Morales-Menéndez, R, Sucar, LE & Rodríguez, CA 2006, 'Diagnosis of a Cutting Tool in a Machining Center', *IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, Pp. 7097-7101.
26. Vallejo, AJ, Morales-Menéndez, R, Garza-Castañón, LE & Alique, JR 2007, 'Pattern Recognition Approaches for Diagnosis of Cutting Tool Wear Condition', *Transactions of the North American Manufacturing of Research Institution of SME*, no 35, Pp. 81-88.
27. Tan, Y. et al 2015, 'Advance in Swarm and Computational Intelligence', *6th International Conference, ICSI 2015*, Part 3, Pp. 115-126.

Стаття надійшла до редакції 07 червня 2023 року