

**В.В. Медведєв, к.т.н., доц.
М.М. Шихалєєв, аспір.**
КПІ імені Ігоря Сікорського, м. Київ

Забезпечення якості поверхневого шару при розточуванні отворів у корпусних деталях

Розроблено методикау визначення вібраційних характеристик технічної обробляючої системи за акустичними сигналами від двох п'єзомікрофонів, запропоновано використати метод інтерференції сигналів. Така методика належить до активних методів моніторингу технологічних процесів. Датчики встановлено на столі і шпинделі верстата. Як сигнали використано інтерференцію двох акустичних датчиків – п'єзомікрофонів. Особливо важливим завданням є дослідження самовиникаючих вібрацій пружної технологічної обробляючої системи (chatter), оскільки вони обмежують продуктивність оброблення різанням. Відповідно, авторами розробляється методика усунення впливів таких коливань на якість поверхонь. Моніторинг і управління технологічними процесами є важливим завданням промисловості, оскільки дозволяє оптимізувати технічну обробляючу систему за критерієм продуктивності. Проведено аналіз діагностичних каналів, розроблено укрупнену схему діагностичної системи. Порівняльний аналіз діагностичних каналів представлено у вигляді таблиці. Оцінку даних запропоновано виконувати в автоматичному режимі з використанням штучних нейронних мереж. Порівняння інтерференції сигналів запропоновано виконувати з використанням автоматичних алгоритмів. Запропоновано метод забезпечення якості поверхневого шару при обробленні отворів у корпусних деталях розточуванням за умов значних осьових вильотів шпинделя через технічну діагностику технічної обробляючої системи за акустичними сигналами. Подальші дослідження необхідно виконати з метою перевірки точності запропонованої методики.

Ключові слова: розточування; якість поверхневого шару; продуктивність оброблення різанням; технічна діагностика; технічна обробляюча система; якість розточування; корпусна деталь.

Постановка проблеми. Діагностування технологічних процесів, стану різального інструменту є важливим завданням промисловості, оскільки дозволяє підвищити продуктивність оброблення різанням на машинобудівних підприємствах, а також підвищити ресурс роботи різального інструменту, знизити рівень браку, недостатньої якості поверхневого шару та геометричних параметрів оброблюваних деталей. Двома основними критеріями оптимізації в технологіях машинобудування, а конкретно в обробленні різанням (як лезовим, так і абразивним інструментом), є продуктивність і якість процесу. Ще одним ключовим критерієм може бути собівартість оброблення, але зазвичай її приймають як обмеження. Забезпечення якості із застосуванням технологічної діагностики для поверхневого шару розглядається в статті. Для цього пропонується використати можливості технічної діагностики технологічних процесів для аналізу поведінки технічної обробляючої системи в режимі активного контролю.

При обробленні отворів у корпусних деталях виникають значні вібрації, що зменшують продуктивність оброблення і якість поверхонь. Особливо значні вібрації генеруються при обробленні отворів осьовим інструментом із малою жорсткістю. Тобто, за таких умов різання на жорсткість інструмента і оправки накладається мала жорсткість шпинделя за умов значного вильоту шпинделя. При цьому жорсткість обробляючої системи спадає нелінійно.

Зазвичай, такі вібрації намагаються усунути за рахунок збільшення жорсткості технічної обробляючої системи, а також віброгасників. Для цього проєктують спеціальні верстатні пристрої – борштанги, розточувальні головки, розточувальні оправки на розточувальних верстатах. Рідше застосовують динамічні компенсатори коливань, оскільки конструкції і технічна реалізація таких компенсаторів є ускладненою.

Також одним із напрямів забезпечення якості та продуктивності технологічних процесів у машинобудуванні є технічна діагностика, або моніторинг, що дозволяє оцінювати і корегувати параметри обробляючої системи. Такий підхід дозволяє замінити механічні борштанги на інтелектуальну систему управління якістю оброблення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор. Наскільки відомо автору з таких джерел [1–6], вібрації при обробленні різанням є одним із основних факторів, що визначають продуктивність і точність оброблення на верстатах на ЧПУ. Вимушені коливання системи утворюються при фрезеруванні та інших операціях. Багато уваги дослідники приділяють моніторингу таких вібрацій в режимі он-лайн [7] та активному контролю [8].

Також розробляються методики застосування Web-технологій для систем моніторингу процесів оброблення [9], в тому числі вібрацій. У таких системах реалізовано технологію інтегрування сенсорів та датчиків. Система датчиків дозволяє проводити непряму діагностику з різних параметрів: сила різання, вібрації, шум тощо. І обробляти отримані дані. Відповідно, проектування алгоритмів, методів обробки та збирання даних є важливим завданням моніторингу процесів оброблення різанням. Усунення хвилястості за допомогою систем активного контролю і впливу на параметри роботи верстата (подача, швидкість обертання шпинделя тощо) є актуальним завданням. Ще одним важливим завданням моніторингу вібрацій є створення концепцій систем активного усунення вібрацій [10, 11]. У [7] досліджено моніторинг еліптичних вібрацій сил різання.

В цілому дослідження сил різання та вібрацій для оптимізації процесів різання та забезпечення продуктивності розглянуті в [12]. Застосування онлайн-моніторингу сил різання при гідро-абразивному обробленні представлено в [13].

Так в [1] представлено концепцію активного структурального методу зменшення хвилястості при фрезеруванні. Застосовано акселерометри та п'єзоелектричні датчики, а також оптимальна стратегія управління, метою якої є підвищення продуктивності в умовах безвібраційного оброблення. Всі компоненти інтегровано у головний шпиндель верстата. При такому методі в умовах експерименту було збільшено продуктивність на 91 %. Але зазначено, що такий концепт має певні труднощі. Наприклад, необхідне забезпечення його ефективності на всіх швидкостях шпинделя і для різних методів, таких як стратегії активного демпфування.

У [2] запропоновано концепцію усунення вібрацій при плоскому фрезеруванні циліндричними фрезами. При цьому застосовується числовий метод Рунге-Кутти моделювання в середовищі Matlab-Simulink для визначення характеристик коливань. Запропоновано надавати заготовці додаткового руху, що визначається контролером.

Усунення вібрацій в активному режимі представлено в [3]. Шпиндель верстата використовується у поєднанні з зовнішнім акселерометром, що знаходиться близько до центру мас інструмента для усунення вібрацій. Тобто, акселерометр винесений із інструмента. Виміряне прискорення застосовується як зворотній зв'язок, додатковий параметр управління. Але зазначається, що такий метод перевірено на великогабаритному фрезерному обробляючому центрі, і дає хороший результат зі стабільності вібраційного процесу, і не досліджено, чи працює такий метод при тонкому фрезеруванні.

У [4] описано розробку тесту швидкості обертання шпинделя (Spindle Speed Ramp-Up test, SSR) замість пелюсткової діаграми стабільності (Stability Lobe Diagram, SLD). Зазначається, що при обробленні алюмінію такий метод дає певну стабілізацію вібрацій без додаткових відомостей про процес оброблення. Також можна застосовувати такі датчики, як динамометр, акселерометр та мікрофон.

У [5] розглянуто застосування акустичного сигналу для усунення ривків (chatter) від внутрішніх коливань системи. Дослідники застосували одночасно індекс акустичного сигналу ривків (acoustic chatter signal index, ACSI) та стратегію компенсації швидкості шпинделя (spindle-speed compensation strategy, SSCS) для оцінки акустичного сигналу і компенсації швидкості обертання шпинделя.

Постановка завдань. Метою роботи є розроблення та представлення алгоритму й методу забезпечення якості поверхневого шару та геометричної точності при розточуванні через зменшення жорсткості системи через технічну діагностику і подальше корегування технологічного процесу.

Викладення основного матеріалу. Діагностика стану обробляючої системи має відбуватися в автоматизованому режимі, без безпосередньої участі людини-контролера та, за можливості, автоматично обробляти отриману інформацію з системи для прийняття рішень з роботи верстата. Тобто, діагностична система, що складається з датчиків, комп'ютерної системи оброблення інформації, мікроконтролерів тощо, має бути інкорпорована (включена) в процес різання. З урахуванням багатьох фізичних явищ у зоні різання, у системі технічної обробляючої системи (ТОС), діагностування є комплексним процесом і включає в себе багато каналів інформації – за виникненням електрорушійної сили в зоні різання, силові явища, теплові, вібраційні тощо. Отже, можна проводити комплексну діагностику по багатьом каналам інформації про стан ТОС або якість поверхневого шару.

Інформація про стан технологічної системи може бути отримана за допомогою спеціальних пристроїв – датчиків. Залежно від принципу дії вони поділяються на індуктивні, ємнісні, акустичні, контактні, світлові, силові тощо [15]. Також їх можна класифікувати за методом встановлення – провідні і непровідні. Для розточування можна застосовувати різні датчики, а саме динамометри, акселерометри, датчики потужності привода верстата, датчики потужності подачі верстата, силові, акустичні, світлові, тензодатчики тощо. В таблиці 1 представлено перелік датчиків за категоріями вимірювального сигналу.

Категорії сигналів у технічній діагностиці технологічних процесів

Інформаційний канал	Тип датчика	Критерії, що ускладнюють використання				
		обертання шпинделя	довжина вильоту шпинделя	замикання стружки на деталь	декілька ріжучих кромок	відсутність сигналу в каналі
1	2	3	4	5	6	7
Електричний	П'єзоелектричний	↑		↑	⇕	
	Трансформаторний	↑		↑	⇕	
	тощо			↑	↑	
Тепловий	Пірометричний тощо	↑	⇕			
Світловий	Оптоволоконний	↑	⇕		⇕	⇕
	Світловий	⇕			⇕	
	Оптоелектронний	⇕			⇕	
	Фотометричний	⇕			⇕	
	Лазерний	↑			⇕	⇕
	Оптичний фоторезисторний перетворювач тощо	⇕	⇕		⇕	⇕
Пружних деформацій	Тензодатчики різних конструкцій	↑	⇕		⇕	
Електромагнітний	Індукційний електромагнітний	↑		⇕	↑	
	Потенціометричний	↑		⇕	↑	↑
	Трансформаторний	↑		⇕		
	Магнітопружний	↑				
	Тахометр-частотомір тощо	↑		⇕		⇕
Силовий	Динамометр	⇕	⇕		⇕	
	Акселерометр	⇕				
	Контактний тощо	↑	↑		⇕	
Акустичний	Акустично-емісійний				⇕	
	Лінійний	⇕	⇕			
	Непрямий	⇕			⇕	
	Доплерівський імпульсний	⇕				
	П'єзомікрофон тощо	↑				
Вібраційний	П'єзоелектричний	↑	⇕			
	Сейсмичний тощо					

1	2	3	4	5	6	7
Потужність приводу	Датчик крутного моменту					
	Динамометр тощо				⇕	
Термо-ЕРС (електро-рушійна сила)	Цифрові напівпровідникові	↑		⇕	↑	
	Генераторні	↑		⇕	↑	

Довідка: розробка автора.

Умовні позначення: ↑ – критерій значною мірою впливає на інформаційний канал; ⇕ – середній вплив

Особливістю технологічного процесу розточування є кінематична схема різання, тобто можливе ускладнення монтування датчиків в елементи технічної оброблюючої системи через обертання шпинделя, заготовки чи інструменту.

Особливо відчутно на якість і продуктивність оброблення впливають коливання, що за визначенням є самовиникаючими вібраціями пружної технологічної оброблюючої системи. Така система є нестабільною з точки зору оброблення, що призводить до зменшення продуктивності оброблення і якості поверхневого шару. Коливання впливають на якість поверхневого шару, а саме на шорсткість та відхилення форми. Розточування в корпусних деталях є поширеним методом оброблення, оскільки є операцією високої точності, а також забезпечує малу шорсткість поверхні. А також є достатньо продуктивним. Розточування можна проводити як на токарних оброблюючих центрах, так і на фрезерних (як горизонтальної, так і вертикальної групи). Діагностика розточування може відбуватися по вібраційних, акустичних, силових каналах. Також важливою є динамічна модель розточування, оскільки вона дозволяє оцінити фізичні явища, що протікають у ТОС при розточуванні, а також врахувати зміну жорсткості при значному вильоті шпинделя.

Завдання полягає в забезпеченні якості оброблених поверхонь за умов малої жорсткості ТОС, зумовленою значним ходом шпинделя, із одночасним забезпеченням продуктивності оброблення на достатньому рівні. Це завдання є багатокритеріальним. Також є багато критеріїв самої якості поверхні. Тому ще одним завданням є встановлення відносин між критеріями процесу обробки та критеріями якості.

До характеристик якості належать хвилястість, овальність, конусність, бочкоподібність, відхилення від співвісності, площинності, циліндричності, прямолінійності, профілю повздовжнього перерізу, круглості, співвісності, шорсткість, а також залишкові напруження. Особливо важливим для розточування є забезпечення співвісності, хвилястість, відхилення від форми.

Оброблення інформації від датчиків запропоновано проводити за допомогою алгоритмів нейромережі, що здатні до самонавчання. Перш за все потрібно створити нейромережі для аналізу вхідних даних від діагностичних каналів та отримання апроксимованих результатів математичної моделі. Також потрібно збудувати математичні моделі, що описують похибки якості оброблення (відхилення від форми). На основі аналізатора даних корегувати параметри протікання технологічного переходу в режимі он-лайн.

Пропонується використати CAE (Computer-aided manufacturing) моделювання для отримання попередніх відомостей про характеристики процесів в оброблюючій системі.

Спрощена блок-схема запропонованих рішень зображена на рисунку 1.

Вихідними даними для інтелектуальної системи є форма заготовки (кругла, корпусна), наявність нарізі та її якість.

Для аналізу необхідно отримувати дані про вібрації на шпинделі і на столі верстата, визначити частоти роботи обладнання з використанням математичного апарата імітаційного моделювання. З цією метою була виконана 3D модель розточування. Запропоновано використання бібліотеки матеріалів користувача. Як оброблювані матеріали використано нержавіючі сталі Сталь 30ХГСА ГОСТ 2879-2006, 35ХМЛ ГОСТ 977-88, 10Г2С ГОСТ 19282-73, 12Х18Н9 ГОСТ 2591-2006 [16]. Основними характеристиками матеріалів для моделювання є густина матеріалу (density, кг-м-3), в'язкість (viscosity, Па-с), межа міцності на розтяг (tensile yield strength, Па), межа міцності на стиск (compressive yield strength, Па), коефіцієнт термального розширення (coefficient of thermal expansion, $^{\circ}\text{C}^{-1}$), ізотропна теплопровідність (isotropic thermal conductivity, Вт/(м \times °C)).

Математична модель для системи пропонується у вигляді 3D моделі розточування в середовищі CAE (рис. 2).

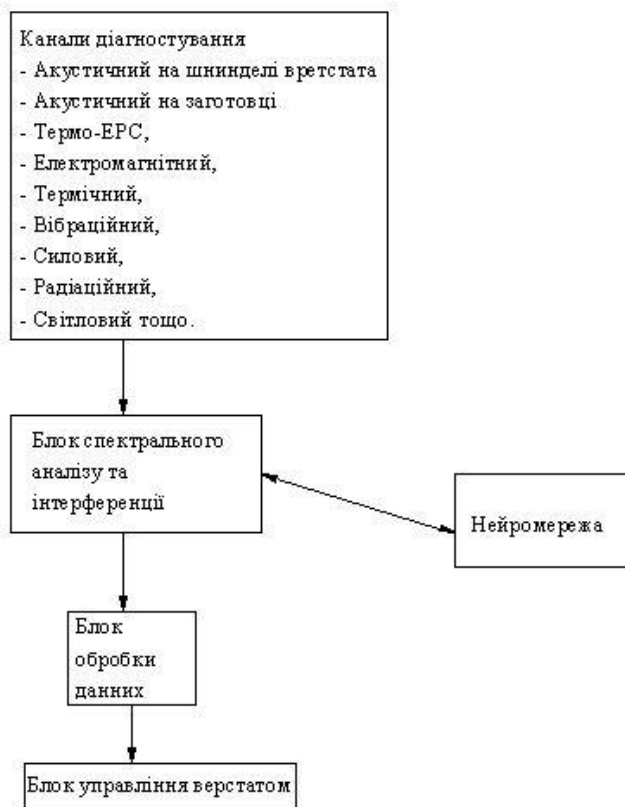


Рис. 1. Спрощена блок-схема запропонованої системи для забезпечення якості оброблення розточуванням отворів у корпусних деталях

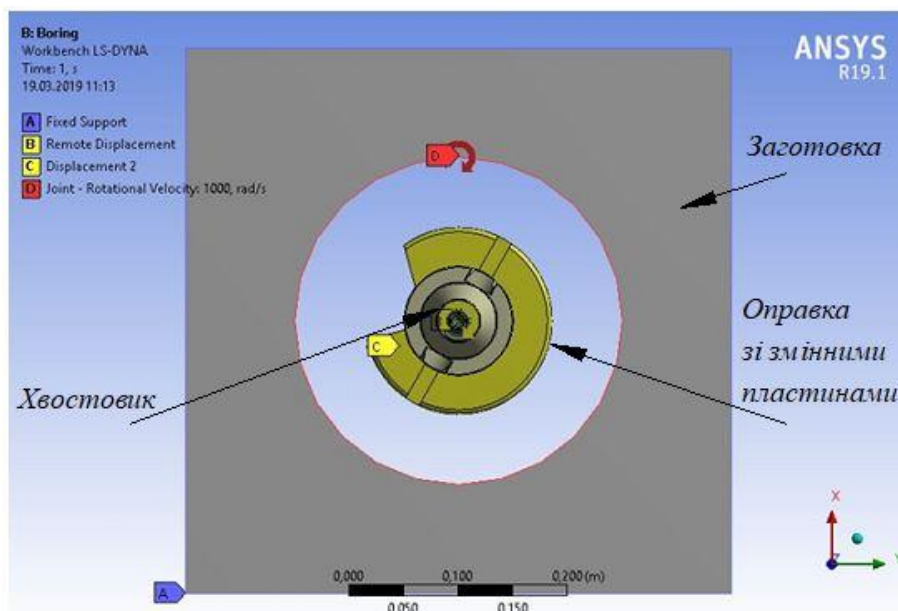


Рис. 2. Спрощена модель розточування в САЕ Ansys Workbench LS-Dyna

Дана спрощена модель включає в себе два елементи – різальний інструмент у вигляді розточувальної головки та заготовку. Така модель дозволяє приблизно оцінити, які технічні характеристики датчиків, що потрібні для отримання коректних даних, а саме чутливість датчика і робочі діапазони частот. Для діагностики процесу розточування пропонується використовувати акустичний діагностичний канал.

Інтерференція сигналів від двох акустичних датчиків, один з яких встановлено на шпинделі верстата, а другий на столі верстата, описується рівнянням:

$$\begin{cases} f_1 = k_1 P_{k1} + k_2 P_{ш0} + k_3 P_{ш2} \cdot \sin \alpha \\ f_2 = k_4 P_{k2} + k_5 P_{ш0} + k_6 P_{ш1} \end{cases}, \quad (1)$$

де k_i – вагові коефіцієнти сигналів, P_{ki} – корисні сигнали від датчиків, $P_{ш0}$ – сигнал шуму, $P_{ш1}$ – сигнал від одного датчика, що відображається в іншому датчику, α – зсув фази при інтерференції двох сигналів.

При цьому приймаємо, що складова сигналу від одного датчика в сигналі іншого є незначною:

$$P_{ш1} \ll P_{ш0}, P_{ш2} \ll P_{ш0}, \quad (2)$$

З урахуванням (2) маємо:

$$\begin{cases} f_1 = k_1 P_{k1} + k_2 P_{ш0} \\ f_2 = k_4 P_{k2} + k_5 P_{ш0} \end{cases}. \quad (3)$$

Формула порівняння сигналів має вигляд:

$$F = f_1 - f_2 = k_1 P_{k1} + k_2 P_{ш0} - (k_4 P_{k2} + k_5 P_{ш0}), \quad (4)$$

$$F = k_1 P_{k1} - k_4 P_{k2} + P_{ш0}(k_2 - k_5) = k_1 P_{k1} - k_4 P_{k2} + K \cdot P_{ш0}, \quad (5)$$

де f – порівняльний сигнал системи, k – коефіцієнт.

При цьому оцінка інтерференції сигналів відбувається в автоматичному режимі, з використанням штучних нейронних мереж, що були описані вище. Для цього необхідно створити нейромережу, здатну до самонавчання через відповідні алгоритми глибокого навчання. Така система штучного інтелекту може бути отримана з використанням спеціального програмного забезпечення, наприклад TensorFlow [17]. Така нейромережа здатна поєднати блок аналізу даних із блоком автоматичної зміни режимів різання на верстаті.

Висновки та перспективи подальших досліджень. По проведеному аналізу діагностичних каналів бачимо, що одним із кращих датчиків з точки зору наладки операції розточування є датчики акустичної емісії. Методика визначення вібраційних характеристик технологічної системи за акустичними сигналами може бути побудована на основі декількох однакових датчиків, встановлених у різних місцях системи. Аналіз даних з цих датчиків запропоновано виконати методом інтерференції сигналів. Оцінку даних можливо виконувати в автоматичному режимі з використанням штучних нейронних мереж.

Запропонований метод можна використовувати для діагностики стану технологічного процесу при розточуванні глибоких отворів в корпусних деталях. Подальші дослідження необхідно виконати з метою перевірки точності запропонованої методики.

Список використаної літератури:

1. Monnin J. Modeling errors influencing active structural methods for chatter mitigation in milling process / J.Monnin, F.Kuster, K.Wegener // Procedia CIRP. – 2014. – № 14. – P. 494–499.
2. Weremczuk A. The concept of active elimination of vibrations in milling process / A.Weremczuk, R.Rusinek, J.Warminski // Procedia CIRP. – 2015. – № 31. – P. 82–87.
3. Active suppression of structural chatter vibrations using machine drives and accelerometers / J.Munoa, X.Beudaert, K.Erkorkmaz and other // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2015. – № 64. – P. 385–388.
4. Spindle speed ramp-up test: a novel experimental approach for chatter stability detection / N.Grossi, A.Scippa, L.Sallese and other // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2015. – № 89. – P. 221–230.
5. Tsai N. Chatter prevention for milling process by acoustic signal feedback / N.Tsai, D.Chen, R.Lee // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2010. – № 47. – P. 1013–1021.
6. Wang M. An examination of the fundamental mechanics of cutting force coefficients / M.Wang, L.Gao, Y.Zheng // International Journal of Machine Tools Manufacturing. – 2014. – № 78. – P. 1–7.
7. Jung H. Study on Process Monitoring of Elliptical Vibration Cutting by Utilizing Internal Data in Ultrasonic Elliptical Vibration Device / H.Jung, T.Hayasaka, E.Shamoto // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2018. – № 5. – P. 571–581 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0059-9>.
8. Active chatter control in high speed milling processes based on H_∞ almost disturbance decoupling problem / F.Shi, H.Cao, D.Li and other // Procedia CIRP. – 2018. – № 37. – P. 78 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [10.1016/j.procir.2018.09.050](https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.050).
9. A Web-based machining process monitoring system for E-manufacturing implementation / B.Shin, G.Kim, J.Choi and other // Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. – 2006. – № 7. – P. 1467–1473 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.A1467>.
10. Monitoring of vibrations and cutting forces with spindle mounted vibration sensors / M.Postel, D.Aslan, K.Wegener, Y.Altintas // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2019. – № 68. – P. 413–416.
11. Єськін М.Ю. Метод діагностування процесу обробки на багатофункціональних верстатах з ЧПУ / М.Ю. Єськін, С.С. Засць // Актуальні задачі сучасних технологій. – 2013. – P. 84–85.
12. A force-measuring-based approach for feed rate optimization considering the stochasticity of machining allowance / Z.Zhang, M.Luo, D.Zhang, B.Wu // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – № 97. – P. 2545–2556.
13. Online-monitoring for Abrasive Waterjet Cutting of CFRP via Acoustic Emission: Evaluation of Machining Parameters and Work Piece Quality Due to Burst Analysis / F.Lissek, M.Kaufeld, J.Tegas, S.Hloch // Procedia Engineering. – 2016. – № 149. – P. 67–76.
14. Altintas Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design / Y.Altintas. – 2nd edn. – Cambridge : Cambridge University Press, 2012.

15. Діагностика технологічних систем і виробів машинобудування (з використанням нейромережевого підходу) : монографія / *С.В. Ковалевський, О.С. Ковалевська, Є.О. Коржов, А.О. Кошевой*. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – 183 с.
16. *Криворучко Д.В.* Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы : монография / *Д.В. Криворучко, В.А. Залого* ; под общ.ред. *В.А. Залого*. – Сумы : Университетская книга, 2012. – 496 с.
17. *Goldsborough P.* A Tour of TensorFlow / *Peter Goldsborough*. – 2016 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.researchgate.net/publication/308895905_A_Tour_of_TensorFlow.

References:

1. Monnin, J., Kuster, F. and Wegener, K. (2014), «Modeling Errors Influencing Active Structural Methods for Chatter Mitigation in Milling Process», *Procedia CIRP*, No. 14, pp. 494–499.
2. Weremczuk, A., Rusinek, R. and Warminski, J. (2015), «The Concept of Active Elimination of Vibrations in Milling Process», *Procedia CIRP*, No. 31, pp. 82–87.
3. Munoa, J., Beudaert, X., Erkorkmaz, K., Iglesias, A., Barrios, A. and Zatarain, M. (2015), «Active suppression of structural chatter vibrations using machine drives and accelerometers», *CIRP Annals*, No. 64 (1), pp. 385–388.
4. Grossi, N., Scippa, A., Sallese, L., Sato, R. and Campatelli, G. (2015), «Spindle speed ramp-up test: A novel experimental approach for chatter stability detection», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, No. 89, pp. 221–230.
5. Tsai, N., Chen, D. and Lee, R. (2009), «Chatter prevention for milling process by acoustic signal feedback», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 47, pp. 1013–1021.
6. Wang, M., Gao, L. and Zheng, Y. (2014), «An examination of the fundamental mechanics of cutting force coefficients», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, No. 78, pp. 1–7.
7. Jung, H., Hayasaka, T. and Shamoto, E. (2018), «Study on Process Monitoring of Elliptical Vibration Cutting by Utilizing Internal Data in Ultrasonic Elliptical Vibration Device», *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, No. 5 (5), pp. 571–581, [Online], available at: <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0059-9>
8. Shi, F., Cao, H., Li, D., Chen, X. and Zhang, X. (2018), «Active chatter control in high speed milling processes based on H_{∞} almost disturbance decoupling problem», *Procedia CIRP*, No. 78, pp. 37–42, No. 10.1016/j.procir.2018.09.050
9. Shin, B., Kim, G., Choi, J., Jeon, B., Lee, H., Cho, M., Han, J. and Park, D. (2006), «A Web-based machining process monitoring system for E-manufacturing implementation», *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, No. 7 (9), pp. 1467–1473, [Online], available at: <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.A1467>
10. Postel, M., Aslan, D., Wegener, K. and Altintas, Y. (2019), «Monitoring of vibrations and cutting forces with spindle mounted vibration sensors», *CIRP Annals*, No. 68 (1), pp. 413–416.
11. Yeskin, M. and Zaiets, S. (2013), «Metod diahnostuvannia protsesu obrobky na bahatofunktsionalnykh verstatakh z ChPU», *Aktualni zadachi suchasnykh tekhnologii*, pp. 84–85.
12. Zhang, Z., Luo, M., Zhang, D. and Wu, B. (2018), «A force-measuring-based approach for feed rate optimization considering the stochasticity of machining allowance», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 97, pp. 2545–2556, [Online], available at: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2127-2>
13. Lissek, F., Kaufeld, M., Tegas, J. and Hloch, S. (2016), «Online-monitoring for Abrasive Waterjet Cutting of CFRP via Acoustic Emission: Evaluation of Machining Parameters and Work Piece Quality Due to Burst Analysis», *Procedia Engineering*, No. 149, pp. 67–76.
14. Altintas, Y. (2012), *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*, 2nd edn, Cambridge University.
15. Kovalevskiy, S., Kovalevska, O., Korzhov, Y. and Koshevoi, A. (2016). *Diahnostyka tekhnolohichnykh system i vyrobiv mashynobuduvannia (z vykorystanniam neyromerezhevoho pidkhodu)*, DDMA, Kramatorsk, 183 p.
16. Krivoruchko, D. and Zaloga, V. (2012), *Modelirovanie protsessov rezaniya metodom konechnykh elementov: metodologicheskie osnovy*, Universitetskaya kniga, Sumy, 496 p.
17. Goldsborough, P. (2019), *A Tour of TensorFlow*, [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/308895905_A_Tour_of_TensorFlow

Шихалєв Максим Максимович – аспірант КПІ імені Ігоря Сікорського.

Наукові інтереси:

- управління процесами різання;
- моніторинг процесів різання.

Медведєв Вадим В'ячеславович – кандидат технічних наук, доцент КПІ імені Ігоря Сікорського.

Наукові інтереси:

- системи автоматичного проектування технологічних процесів на основі математичного апарата штучного інтелекту;
- моніторинг процесів різання за допомогою математичного апарата штучного інтелекту.

Стаття надійшла до редакції 18.10.2019.