

**Мельничук Б.П.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Шевченко В.В.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## КОМПЛЕКСНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИЛАДІВ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

*У статті представлено комплексну систему контролю процесу обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва, математичну модель зносу різального інструменту та блок схему проведення вимірювань зносу інструменту в режимі реального часу.*

*Комплексна система контролю складається із двох частин. Перша частина це система контролю рівня лінійного зносу різального інструменту в режимі реального часу на основі ультразвукової діагностики різального інструменту. Цей метод дозволить проводити вимірювання рівня зносу, а також проводити діагностику різального інструменту в режимі реального часу на верстатах із числовим програмним керуванням. Точність вимірювань ультразвукового методу, а саме часу проходження ультразвукової хвилі в тілі інструменту становить 1 нс, відповідно похибка вимірювання рівня зносу становить 2 мкм.*

*Друга частина це система контролю якості поверхні, а саме геометричного параметру шорсткості ( $R_a$ ,  $R_z$ ). Вимірювання проводяться за допомогою безконтактного методу хроматичного конфокального зондування. Цей метод дозволить проводити вимірювання на місці, що дає можливість зменшити кількість похибок, які вносяться при повторній установці деталі. Похибка цього методу становить 5%, в порівнянні з контактними методами. Оптичний метод конфокального зондування дозволяє точно виміряти шорсткість поверхні з параметром  $R_a$  0.2-0.7. Принципова схема вимірювання за допомогою методу конфокального хроматичного зондування та результати вимірювань поверхні при різних режимах обробки представлені в роботі.*

*Для першої частини комплексної системи розроблена математична модель, яка показує залежність рівня лінійного зносу різального інструменту, від часу проходження ультразвукової хвилі в тілі інструменту. Також, розроблена блок-схема вимірювання зносу різального інструменту.*

*Впровадження комплексної системи обробки деталей приладів у виробництво дозволить підвищити точність обробки та якість поверхні деталі, що дасть можливість зменшити кількість бракованих деталей та підвищити продуктивність автоматизованого виробництва. Розроблена система також може бути використана для встановлення залежності параметрів шорсткості поверхні деталі від рівня зносу різального інструменту.*

**Ключові слова:** параметри шорсткості, якість поверхні деталей приладів, знос різального інструменту, ультразвукова діагностика, конфокальне хроматичне зондування, автоматизоване виробництво.

**Вступ.** Знання рівня зносу та очікуваного терміну роботи різального інструменту є вхідними даними для оцінювання надійності та працездатності автоматизованого обладнання. Для цього створюють контрольні системи процесу різання на основі розроблених непрямих методів моніторингу зносу різального інструменту. Такі системи дозволяють в режимі реального часу проводити аналіз зносу різального інструменту, та попередити критичний знос чи поломку інструменту і, відповідно, не допустити браку деталі, забезпечити високу точність та малу шорсткість поверхні, тобто підвищити економічну ефективність виробництва [1].

Експлуатаційні характеристики деталей, які впливають на надійність і точність приладу, знаходяться в прямій залежності від параметрів шорсткості поверхні деталей цього приладу, тому дуже важливо їх обробити із наперед заданими параметрами шорсткості [2]. Використання звичайних засобів вимірювання шорсткості поверхні передбачає зняття деталі із деталетимача, та використання спеціальних пристроїв. Це збільшує час виробництва деталі та вносить частку похибок, коли виникає потреба в повторній установці. Одночасно з тим портативні прилади не можуть бути застосовані для деталей малих розмірів, або

складних геометричних форм. Тому були безконтактні методи вимірювання шорсткості на місці.

**Постановка проблеми.** Різальний інструмент постійно піддається зносу, із-за тертя пари «інструмент-деталь», механічних напружень, пластичних деформацій, високих температур, мастильно-охолоджуючих рідин. Це зменшує його працездатність та підвищує ризик поломки інструменту та невідповідності деталі кресленню.

Для вимірювання параметрів шорсткості традиційними методами часто необхідно знімати деталь з верстата між операціями, що може викликати деякі похибки, неточності в процесі обробки деталі. У той же час портативні прилади для вимірювання параметрів шорсткості непридатні для вимірювання деталей малих розмірів і складної геометрії, а в приладобудуванні таких деталей - більшість.

**Постановка завдання.** Метою є розробка комплексної системи контролю процесу обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва, яка дозволить в режимі реального часу контролювати стан та оцінювати знос різального інструменту, на основі ультразвукових досліджень та контролю якості поверхні деталей приладів, а саме геометричного параметру шорсткості в умовах безлюдного виробництва, з використанням безконтактного оптичного методу конфокального зондування, з проведенням вимірювань на місці, тобто без зняття деталі з верстату, для підвищення точності обробки деталей.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** До якісних показників деталей приладів відносять такі: міцність, надійність, довговічність. Вони залежать від структури та властивостей матеріалу заготовки, термічної та хімічної обробки. Найбільш залежними від показників якості поверхні деталі є надійність та довговічність, ці параметри визначаються наступними ознаками [3]:

- фізико-механічні властивості поверхневого шару;
- шорсткістю поверхні.

Шорсткість поверхні визначається як сукупність нерівностей, які утворюють фактичний рельєф поверхні з відносно малим кроком на базовій довжині. Цей рельєф може виникнути під час обробки, в результаті утворення виступів, западин, зміцнення або руйнування поверхневого шару матеріалу та виникнення внутрішніх напружень. Показник шорсткості має великий вплив на експлуатаційні характеристики деталей та вузлів машин, такі як стійкість до зносу поверхонь в місцях контакту, витривалість, корозійну стійкість,

збереження герметичності та натягу в пресових з'єднаннях [4].

Існують два способи оцінювання шорсткості поверхні: якісна оцінка, та кількісна.

Під якісною оцінкою розуміють візуальне порівняння отриманої шорсткості з так званими еталонами – спеціально виготовленими зразками поверхні з наперед заданою та відомою шорсткістю.

Недоліками якісних методів визначення параметрів шорсткості поверхні є суб'єктивність та низька точність. Такі методи не дають детальної інформації про форму та розташування нерівностей поверхні.

Перевагою якісних методів є їх простота та низька вартість порівняно з кількісними методами.

Кількісні методи визначення параметрів шорсткості поверхні за методом проведення вимірювань ділять на два типи: контактні та безконтактні.

До контактних методів відносять методи з використанням контактних пристроїв: профілографів та профілометрів.

Ці прилади мають гостро заточену алмазну голку, що знаходиться в контакті з поверхнею деталі. При її переміщенні виникають коливання перпендикулярні поверхні, які вловлює датчик та перетворює їх в електричні сигнали. Такі прилади дозволяють забезпечити вимірювання нерівностей до 20 мкм.

Головним недоліком є те, що при контакті голки, поверхня пошкоджується, тому цей метод не може бути застосовано для вимірювання шорсткості поверхні деталей виготовлених з м'яких матеріалів. Тому було розроблено низку безконтактних методів вимірювання шорсткості поверхні: температурний, пневматичний, ультразвуковий, оптичні [5].

Найчастіше використовують оптичні методи, оскільки вони забезпечують високу роздільну здатність, точність та швидкість отримання даних, а також дозволяють проводити вимірювання безпосередньо на місці обробки деталі [6].

Одним з таких методів є метод хроматичного конфокального зондування. Він заснований на використанні явища дисперсії світла. Схема вимірювання зображена на рис. 1. Принцип вимірювання наступний: біле світло, що випромінюється джерелом S, проходить через хроматичну лінзу L. Після проходження лінзи Д, світло розкладається в спектр та фокусується на поверхні досліджуваної деталі. При цьому на поверхні фокусується лише одна довжина хвилі. Відбите світло повертається назад, та проходить через

отвір Р, який фільтрує всі довжини хвиль окрім однієї,  $\lambda_j$ . Датчик рухається на певній відстані від поверхні, відповідно на поверхню буде фокусуватися постійно одна з довжин хвиль, залежно від глибини впадини чи виступу.

Датчиком є конфокальний хроматичний сенсор. В залежності від шорсткості використовують датчик з діапазоном чутливості 100 нм, який має роздільну здатність 5 нм, або з діапазоном чутливості 400 нм та роздільною здатністю 22 нм.

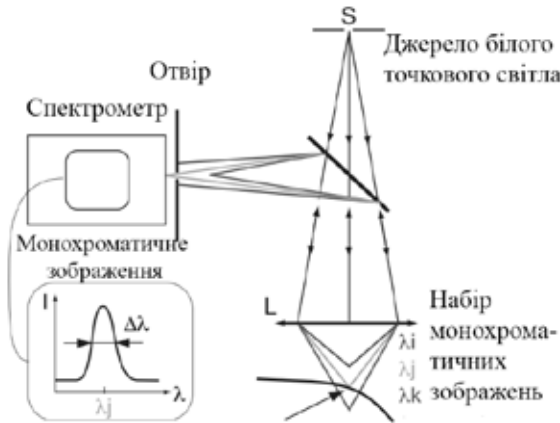


Рис. 1. Принципова схема вимірювання параметрів шорсткості

Для вимірювання на місці вимірювальна головка встановлюється на шпинделі верстата за допомогою спеціального пристрою та стандартного кріплення для тримача інструменту. Таким чином, вимірювання проводяться вздовж вертикальної теоретичної осі верстату, тобто осі Z [7].

Датчик підключений до контролера за допомогою оптоволоконного проводу. Сигнал, який надається контролером, оброблюється на комп'ютері. В залежності від потреб можна отримати як профілограму (рис. 2) так і топографію поверхні деталі після обробки.

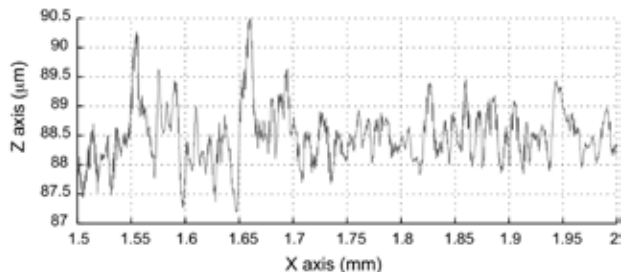


Рис. 2. Профілограма отримана методом оптичного конфокального зондування [8]

На рис. 3 зображено результати вимірювання геометрії поверхні після а) фрезерування; б) шліфування зернистість 120; в) шліфування зерни-

стість 240 [8]. Вимірювання проводились на плиті розміром 50x50 мм, виготовлено із сталі 4ХМНФС ДСТУ 7807:2015.

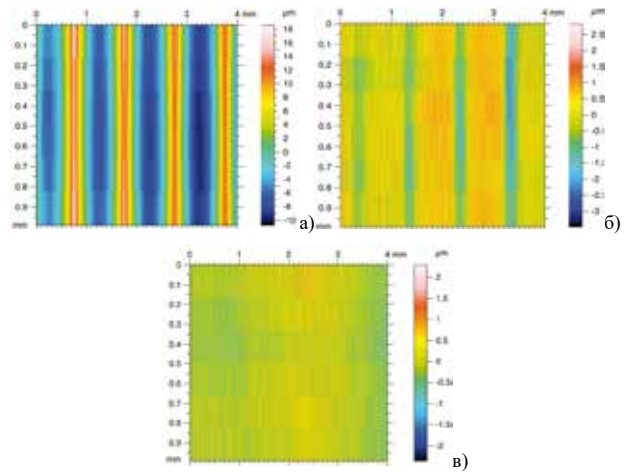


Рис. 3. Результати вимірювання геометрії поверхні [8]

Цей метод має низку переваг, порівняно з іншими оптичними методами: дозволяє проводити вимірювання будь яких поверхонь: вигнутих, дзеркальних, нахилених; має високу роздільну здатність, оскільки, в теорії світлової хвилі можна ділити багато разів; забезпечує стабільність вимірювання в різних температурних умовах, оскільки не відбувається нагріву в процесі вимірювання; світлова хвиля постійно автоматично фокусується на поверхні деталі в межах діапазону; завдяки компактності дозволяє проводити вимірювання автоматично та дистанційно, датчик можна під'єднати за допомогою оптоволоконна; світловий сигнал є стійким до впливу електромагнітного випромінювання; забезпечується довговічність завдяки використанню світлодіодів; на відміну від лазерного методу, цей є безпечним для людського ока та не потребує великих потужностей [9].

Порівняно з контактним методом, метод конфокального зондування має середню похибку 5% [8] і може точно вимірювати шорсткість поверхні з параметром Ra 0,2-0,7. Цей метод може зробити вимірювання з дуже високою точністю та задовольнити виробничі потреби у виробництві приладів.

Крім того, оскільки вимірювання виконуються під час обробки, без зняття деталі з верстату, то додаткові похибки установки не вносяться.

Методи контролю зносу інструменту поділяють на прямі та непрямі. Непрямі методи мають ряд переваг, оскільки вимірювання можна проводити безпосередньо в процесі обробки деталі. Але зазвичай такі методи потребують використання складних систем, які є недостатньо точними, та

залежними від умов обробки. Наприклад використання мастильно-охолоджуючих рідин унеможливає використання температурних та оптичних методів контролю зносу. Вимірювання зносу на основі складових сил різання потребує складної модифікації системи верстату та зменшення жорсткості системи загалом, методи акустичної емісії та вимірювання потужності різання мають низьку стійкість до зовнішніх впливів (вібрації, електромагнітні хвилі) [10].

Одним з непрямих методів є ультразвуковий метод контролю розмірного зносу різального інструменту. Заснований цей метод на вимірюванні часу проходження ультразвукової хвилі шляху «випромінювач-зношена ділянка інструменту-приймач». Маючи відомі значення швидкості поширення звуку в матеріалі легко визначити пройдений шлях. При поступовому зносі, ця дистанція буде зменшуватись, а рівень сигналу збільшуватись, оскільки площа зношеної ділянки буде зростати.

Ультразвук подається в тіло за допомогою п'єзоелектричного джерела у вигляді імпульсів. Коли звукова хвиля вдаряється об поверхню різального інструменту, то частина енергії відбивається та повертається у вигляді ехо-сигналу. Відразу після випромінювання п'єзоелемент переходить в режим приймача. Час, за який звук проходить відповідну дистанцію може бути виміряно з точністю до 1 нс, відповідно, за допомогою методу ультразвукового контролю можна визначити розмірний знос різального інструменту з точністю  $\pm 2$  мкм.

Для покращення результатів вимірювання на різальному інструменті створюється мітка, з наперед відомими розмірами. Таким чином ультразвукова хвиля, що випромінена в тіло інструменту повернеться у вигляді трьох ехо-сигналів: від калібрувальної мітки, від ділянки зносу, та найдовший шлях – від бічних поверхонь різального інструменту. Таким чином, вимірюючи різницю часу між двома сигналами можна оцінювати знос інструменту, не зважаючи на такі фактори наявність мастильно-охолоджуючих рідин чи матеріал оброблюваного інструменту, тощо [11].

В процесі вимірювання основними вважаються наступні показники: площа зношеної ділянки ( $S$ ), кут падіння звукових хвиль на ділянку зносу в горизонтальній та вертикальній площинах ( $\alpha_1, \alpha_2$ ) та температура різального інструменту ( $f(T)$ ).

Наближену загальну площу ділянки зносу можна записати у вигляді:

$$S = W \cdot H \cdot \left( 1 - k_2 + \frac{\pi}{2} k_1 k_2 \right)$$

де  $W$  – ширина ділянки зносу,  $H$  – висота ділянки зносу,  $k_1$  та  $k_2$  – константи, які задаються з бази даних.

Кількість енергії ехо-сигналу, пропорційна площі зношеної ділянки, тому її можна виразити наступним чином:

$$\frac{P_{omp}}{P_{випр}} \sim S^2 \text{ або } P_{omp}^{Pi3} = k_3 S^2 P_{випр} \quad (2)$$

де  $P_{omp}^{Pi3}$  – отримана частина відбитої енергії від зношеної області,  $P_{випр}$  – кількість випроміненої енергії,  $S$  – площа відбиваючої поверхні,  $k_3$  – константа.

Кількість енергії ехо-сигналу, пропорційна куту падіння  $\alpha_1$  в горизонтальній площині, тому її можна виразити наступним чином:

$$\frac{P_{omp}}{P_{випр}} \sim \frac{1}{\cos(\alpha_1)} \text{ або } P_{omp}^{Pi3} = k_4 \frac{1}{\cos(\alpha_1)} P_{випр} \quad (3)$$

де  $k_4$  – константа.

Кількість енергії ехо-сигналу, пропорційна куту падіння  $\alpha_2$  в вертикальній площині, тому її можна виразити наступним чином:

$$\frac{P_{omp}}{P_{випр}} \sim \cos(\alpha_2) \text{ або } P_{omp}^{Pi3} = k_5 \cos(\alpha_2) P_{випр} \quad (4)$$

де  $k_5$  – константа.

На кількість енергії також впливає температура різального інструменту, тому залежність можна виразити математичною функцією  $f_1(T)$ . Тоді модель виглядає наступним чином:

$$\frac{P_{omp}}{P_{випр}} \sim T \text{ або } P_{omp}^{Pi3} = f_1(T) P_{випр} \quad (5)$$

де  $T$  – температура інструменту,  $f_1(T)$  – функція, що представляє вплив температури на отриману кількість енергії.

Тоді модель енергії, що відбивається від різальної кромки інструменту, можна представити наступним чином:

$$P_{omp}^{Pi3} = \left( k_3 S^2 \cdot k_4 \frac{1}{\cos(\alpha_1)} \cdot k_5 \cos(\alpha_2) \cdot f_1(T) \right) \cdot P_{випр} \quad (6)$$

Оскільки калібрувальна мітка – це плоска поверхня з кутом падіння ультразвукового пучка рівним  $90^\circ$  та її температура така сама, як і в різця, то її модель можна виразити так:

$$P_{omp}^{Mimku} = f_1(T) \cdot P_{випр} \quad (7)$$

Тоді порівнюючи кількість енергії ехо-сигналу отриманої від мітки та від ділянки зносу можна виразити аналітичну модель зносу різального інструменту:

$$\frac{P_{omp}^{Pi3}}{P_{omp}^{Mimku}} = k_3 S^2 \cdot k_4 \frac{1}{\cos(\alpha_1)} \cdot k_5 \cos(\alpha_2) \quad (8)$$

Розроблена математична модель (8) показує залежність кількості енергії ехо-сигналу від кута падіння пучка ультразвукових хвиль в горизонтальній та вертикальній площинах, та від площі зношеної ділянки. Порівнюючи кількість енергії поверненої від ділянки зносу та від мітки можна досить точно виміряти рівень зносу різального інструменту безпосередньо в процесі обробки.

Блок-схема (рис. 4) складається з таких елементів: п'єзоелектричний перетворювач 1, він генерує та зчитує звукові хвилі та встановлений в державку різального інструменту. Прийнятий сигнал підсилюється та фільтрується від шуму в блоці 2, після чого надходить на вхід аналогово-цифрового перетворювача 3. З АЦП цифровий сигнал надходить до електронно-обчислювальної машини 4, де оцінюється знос та швидкість зносу різального інструменту та порівнюється з базою даних 5, яка містить інформацію про критичний та допустимий рівень зносу для даного інструменту. Після оцінки ЕОМ посилає сигнал про стан різального інструменту в блок 6, в якому відбувається коригування режиму різання. Після коригування інформація подається на блок керування 7, який формує керуючі сигнали. Ці сигнали записуються в програму верстату з ЧПК 8. Тоді програма надсилає їх на виконавчі механізми верстату 9.

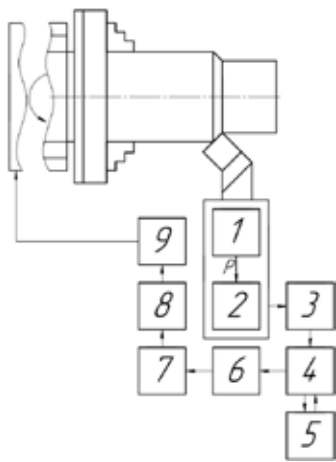


Рис. 4. Блок-схема системи контролю зносу різального інструменту

**Висновки.**

1. Проведений аналіз методів контролю параметру шорсткості показав, що оптичні методи є оптимальним вибором, оскільки забезпечують високу роздільну здатність, безперервність сигналу та високу швидкість проведення вимірювань. Тому було обрано метод конфокального хроматичного зондування.

2. Аналіз методів діагностики зносу різального інструменту в процесі обробки показав, що використання непрямих методів зазвичай потребує зміни конструкції верстату, що призводить до зменшення жорсткості системи верстату. Тому було обрано метод ультразвукової діагностики.

3. Розроблена математична модель, що заснована на методі ультразвукового контролю, яка дозволяє оцінювати рівень розмірного зносу різального інструменту в процесі обробки.

4. На основі математичної моделі розроблена система контролю стану та рівня зносу різального інструменту в процесі обробки для верстатів з ЧПК, яка не потребує складної зміни конструкції верстату та дозволяє проводити вимірювання при будь яких режимах обробки.

5. Розроблена система контролю якості поверхні, а саме геометричного параметру шорсткості поверхні ( $Ra$ ,  $Rz$ ) деталей, з використанням безконтактного методу хроматичного конфокального зондування, з проведенням вимірювань на містці, що дозволить зменшити кількість похибок, що вносяться при повторній установці деталі.

6. Розроблена блок схема комплексної системи контролю процесу обробки деталей в умовах автоматизованого виробництва. Дана система дозволить підвищити точність та надійність процесу обробки деталей приладів на верстатах з ЧПК, зменшити кількість бракованих деталей, що дасть змогу збільшити продуктивність роботи та знизити собівартість автоматизованого виробництва. Також система може бути використана для дослідження залежності параметрів шорсткості поверхні від розмірного зносу різального інструменту та знаходження оптимальних режимів обробки.

**Список літератури:**

1. В. Остаф'єв В.А., Тимчик Г.С., Шевченко В.В. Адаптивна система управління. Механізація і автоматизація управління. Київ, 1983. С. 18–20.
2. Grohmann C. H., Hargitai H. Surface Roughness. Encyclopedia of Planetary Landforms. New York, NY, 2014. С. 1–4. URL: [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9213-9\\_633-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9213-9_633-1) (дата звернення: 15.03.2023)
3. How to solve quality problems by advanced fully-automated manufacturing systems / M. J. R. Costa та ін. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Т. 94, № 9-12. С. 3041–3063. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0158-8> (дата звернення: 17.03.2023).
4. Davim J. P., Markopoulos A. P., Markopoulos A. Advanced Machining Processes: Innovative Modeling Techniques. Taylor & Francis Group, 2017. 327 с.

5. Review of measurement methods for areal surface roughness / HE Bao-feng та ін. Optics and Precision Engineering. 2019. Т. 27, № 1. С. 78–93. URL: <https://doi.org/10.3788/ope.20192701.0078> (дата звернення: 15.03.2023).
6. Jia Z., Hu Z. Evaluation methods of material surface macro-roughness. Materials Research Innovations. 2015. Т. 19, sup8. С. S8–293–S8–296. URL: <https://doi.org/10.1179/1432891715z.0000000001682> (дата звернення: 15.03.2023).
7. Yandayan T., Burdekin M. In-process dimensional measurement and control of workpiece accuracy. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1997. Vol. 37, no. 10. С. 1423–1439. URL: [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(97\)00019-9](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(97)00019-9) (дата звернення: 15.03.2023).
8. Quinsat Y., Tournier C. In situ non-contact measurements of surface roughness. Precision Engineering. 2012. Т. 36, № 1. С. 97–103. URL: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.07.011> (дата звернення: 15.03.2023).
9. Chromatic Confocal Sensor Vs. Laser Displacement Sensor. Chromatic Confocal Sensor Manufacturer. URL: <https://www.geramtech.com/chromatic-confocal-sensor-advantages/> (дата звернення: 15.03.2023).
10. Шевченко В.В., Коробцов, С.І., Богачев Є.В., Заєць С.С. Система діагностики працездатності різального інструменту на верстатах з ЧПК.// Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2018. Том 29 (68), № 2. С. 198–202.
11. Abu-Zahra N. H., Nayfeh T. H. Calibrated method for ultrasonic on-line monitoring of gradual wear during turning operations. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1997. Т. 37, № 10. С. 1475–1484. URL: [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(96\)00091-0](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(96)00091-0) (дата звернення: 18.03.2023)

#### **Melnychuk B.P., Shevchenko V.V. A COMPLEX SYSTEM OF CONTROL OF THE PROCESSING OF DEVICE PARTS IN AUTOMATED PRODUCTION**

*The article presents a complex system of control of the processing of device parts in automated production, a mathematical model of cutting tool wear, and a block diagram for measuring tool wear in real time.*

*The complex system of control consists of two parts. The first part is a system for monitoring the level of linear wear of a cutting tool in real time based on ultrasonic diagnostics of the cutting tool. This method will allow you to measure the level of wear, as well as to diagnose the cutting tool in real time on machines with computer numeric control. The measurement accuracy of the ultrasonic method, namely the time of the ultrasonic wave in the tool body, is 1 ns, and the wear measurement error is 2 microns.*

*The second part is a surface quality control system, namely the geometric roughness parameter ( $R_a$ ,  $R_z$ ). Measurements are made using the non-contact chromatic confocal sensing method. This method allows to take measurements in-situ, which reduces the number of errors introduced when the part is reinstalled. The error of this method is 5% compared to contact methods. The optical method of confocal sensing allows you to accurately measure the surface roughness with a parameter of  $R_a$  0.2-0.7. The schematic diagram of the measurement using the confocal chromatic sensing method and the results of surface measurements under different processing conditions are presented.*

*For the first part of the complex system, a mathematical model was developed that shows the dependence of the level of linear wear of the cutting tool on the time of ultrasonic wave transmission in the tool body. A block diagram for measuring cutting tool wear was also developed.*

*The introduction of an complex system of control of the processing of device parts into production will improve the machining accuracy and surface quality of the part, which will reduce the number of defective parts and increase the productivity of automated production. The developed system can also be used to determine the dependence of the part surface roughness parameters on the level of cutting tool wear.*

**Key words:** roughness parameters, surface quality of device parts, wear of cutting tools, ultrasound diagnostics, chromatic confocal sensing, automated production.