

УДК 681.2.008

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/18>**Пилипенко В.О.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Шевченко В.В.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Гуменюк Т.С.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

У роботі обґрунтована актуальність створення автоматизованої системи контролю процесу обробки деталей в гнучких виробничих системах.

Впровадження автоматизованої системи у виробництво дозволить підвищити точність обробки деталей та зменшити кількість бракованих деталей, що дасть можливість підвищити продуктивність та знизити собівартість виробництва. Проведено критичний аналіз систем контролю процесу обробки деталей, який показав, що найбільш ефективним засобом є контроль на основі вимірювання електричних сигналів, а саме змінної складової електрорушійної сили. Дослідження показали, що величина і характер змінної складової електрорушійної сили залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів інструмента та деталі, фактичної площі торкання, а також процесів тертя та зносу. На основі проведених теоретичних досліджень встановлено взаємозв'язок електричних сигналів, зокрема постійної і змінної складової електрорушійної сили, із рівнем зносу інструменту. Виявлені основні причини генерування електричних сигналів, до яких відносяться екзоелектронна емісія, яка пов'язана з пластичним деформуванням. Запропонований новий метод вимірювання змінної складової електрорушійної сили без конструктивних змін верстата та без електричної ізоляції інструмента та деталі. Розроблена математична модель зносу різального інструменту на основі вимірювання змінної складової електрорушійної сили. Розроблена блок-схема автоматизованої системи контролю процесу обробки деталей на основі електричних сигналів, яка складається з датчиків зносу, дотику та поломки інструмента. Розглянуті ключові елементи та принцип роботи системи. Запропонований пристрій для вимірювання змінної складової електрорушійної сили. Розроблена систему контролю процесом обробки деталей на верстатах з ЧПК в умовах використання гнучких виробничих систем, що дозволяє реєструвати критичний знос та поломку різального інструменту, здійснювати його розмірне налаштування безпосередньо на верстаті.

**Ключові слова:** контроль процесу обробки, автоматизоване виробництво, гнучкі виробничі системи, знос різальних інструментів, електричні сигнали, змінна складова електрорушійної сили, поломка різального інструменту.

**Постановка проблеми.** Збільшення науково-технічного прогресу надзвичайно залежить від автоматизації виробничих процесів, яка в сучасних умовах виробництва реалізується через впровадження автоматизованих верстатних комплексів. Ці комплекси можуть включати в себе окремі верстати з числовим програмним керуванням, автоматичні лінії, модульні автоматичні лінії або гнучкі виробничі системи [1]. Завдяки впровадженню гнучких виробничих систем значно підвищується продуктивність праці і зменшується

кількість працюючих. Однак процес переходу до гнучких виробничих систем відбувається досить повільними темпами, що частково зумовлено відсутністю надійних засобів контролю процесу обробки деталей приладів, таких як стан різального інструменту, вузлів верстатів та пристроїв числового програмного керування [2].

У залежності від умов експлуатації, частка відмов різального інструменту може складати до 63% від загальної кількості відмов верстатів з ЧПК, які оператор усуває. При цьому витрати часу на вияв-

лення та усунення відмов різальних інструментів становлять у середньому 10% загального часу роботи верстатів. Часті відмови різального інструменту на одній позиції часто призводять до виходу з ладу інструментів на наступних операціях і, в більшості випадків, є головною причиною браку продукції і відмов вузлів верстату. Робота з надмірно зношеним різальним інструментом може призвести до втрати дорогого інструментального матеріалу. Використання на виробництві діелектричних інструментальних матеріалів, таких як кераміка, металокераміка, кубічний нітрид бору, потребує розробки нових ефективних методів і засобів контролю процесу обробки деталей приладів. Ці методи і засоби повинні дозволяти без конструктивних змін в устаткуванні здійснювати дистанційний контроль і управління процесом різання матеріалів [3].

На сьогоднішній день, як в українських, так і в зарубіжних наукових колах, інтенсивно проводяться дослідження у галузі обробки матеріалів різанням. Ці дослідження спрямовані на розробку та вдосконалення методів і засобів контролю стану різального інструменту. Незважаючи на досягнуті результати, деякі системи контролю потребують подальшого розвитку та удосконалення з метою підвищення їх швидкодії, роздільної здатності та надійності. Створення ефективних систем контролю працездатності інструменту неможливе без подальших досліджень у фізиці процесу різання та встановлення взаємозв'язку між явищами, що виникають при різанні, та станом різального інструменту [4].

**Постановка проблеми.** Контроль процесу обробки деталей передбачає реєстрацію його критичного зносу та його ж поломку, а також визначення моментів початку та кінця різання. Для чистових операцій основною функцією засобів контролю буде реєстрація критичного зносу різального інструменту. Тому, перш ніж приступити до аналізу існуючих методів та систем контролю працездатності різального інструменту, розглянемо фізичні основи теорії тертя та зносу інструменту.

Процес зносу різального інструменту не можна розглядати ізольовано від процесу тертя, а встановлення загальних закономірностей процесів тертя та зносу контактуючої пари «інструмент – деталь» дозволить розкрити фізичну основу взаємозв'язку явищ, що супроводжують процес різання, із зносом інструменту і тим самим на науковій основі вести створення систем контролю стану та працездатності різального інструмента.

Враховуючи, що процес різання протікає при високих значеннях відносної деформації, при цьому деформації локалізовані в малому обсязі пластичної зони і швидкість деформації висока, а також, що свіжоутворена поверхня деформованого металу, що зрізається, хімічно чиста, проблема зносу інструменту повинна вирішуватися на базі теорій тертя матеріалів, пластичної деформації, електронної техніки, електромагнітної динаміки, радіаційної фізики, закономірностей адгезійного, абразивного, дифузійного та окисного видів зносу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В Україні перші дослідження змінної складової електрорушійної сили, які виникають в процесі обробки деталей, були проведені в 1980 році в Київському політехнічному інституті під керівництвом професора Остаф'єва В. О. [1]. За кордоном відомі дослідження взаємозв'язку електричних сигналів зі зносом різального інструменту [4].

На основі розгляду фізики процесу зношування різального інструменту, встановлено чотири основні види зносу інструменту: абразивний, адгезійний, дифузійний та окисний. Залежно від умов різання може переважати один із цих видів чи діяти одночасно кілька видів.

Механізм абразивного зносу полягає в тому, що тверді вклучення оброблюваного матеріалу, проникаючи в контактні поверхні інструменту, дряпають ці поверхні. Адгезійний знос інструменту – це відрив силами адгезії частинок інструментального матеріалу. Вважається, що основною ознакою схоплювання є утворення металевих зв'язків у результаті спільного пластичного деформування. Високі пластичні деформації, тиск [5] та температура у зоні контакту, а також інтенсивна адгезія при високих швидкостях різання сприяють взаємному дифузійному розчиненню компонентів інструментального та оброблюваного матеріалів. Процес дифузії характеризується коефіцієнтом дифузії, величина якого залежить від температури різання та енергії активації. Пластична деформація, що супроводжує процес різання, збільшує потенційну енергію кристалічних ґрат металу, що полягає у зменшенні роботи виходу електрона.

Методи аналізу та контролю зношування інструменту можна розділити на безпосередні та непрямі, що здійснюються на верстаті та поза верстатом, у процесі різання або перериваючи процес різання.

Прямі передбачають безпосереднє вимірювання параметрів зносу, при цьому контролюється знос (по лунці, що утворюється на передній

поверхні), відстань від різальної кромки до центру лунки, глибина лунки, ширина стрічки зносу по задній поверхні, зменшення обсягу або маси інструменту, розмірний знос різальної кромки, розкид розмірів деталей в партії і т.д. Зазначені параметри можуть бути визначені радіоактивними, оптико-телевізійними, лазерними, електромеханічними, ультразвуковими або пневматичними методами. Суть оптичних методів полягає в тому, що зі зміною зносу змінюється відбивна здатність задньої грані інструмента. У вимірювальному пристрої оптико-електронний датчик фокусує зображення на оптичну щілину, за якою розташовується катод фотопідсилювача. Недоліком способу є висока чутливість до зовнішніх умов експлуатації (запиленість повітря, вплив технологічної рідини і т.д.), що є суттєвою перешкодою для його впровадження у виробничих умовах. Знаючи швидкість і час поширення ультразвуку в середовищі, легко визначити відомий шлях. Встановлено, що методом ультразвукового контролю можна виміряти різницю шляху з точністю  $\pm 2$  мкм. Аналіз показав, що температура є домінуючим чинником, що визначає стан різальної частини інструмента. Ріст зносу викликає ріст потужності джерела теплоти, а потім і ріст температури [6]. При більших швидкостях різання температура визначає структуру й властивості інструментального матеріалу, від яких залежить інтенсивність зносу й наробинок до відмови. Знос різального інструменту призводить не тільки до зміни його геометрії, але й викликає зміну процесів, що впливають на віброакустичні коливання [7]. Так, можуть змінюватися пластичні деформації при стружко утворенні й деформації поверхневого шару деталі, змінюються умови наросту-утворення й швидкість руху стружки по передній поверхні, контактні процеси й властивості інструментального матеріалу. У зв'язку з випадковим характером впливу всіх цих процесів і факторів на віброакустичні коливання, а також у зв'язку з випадковим характером самого зносу, частота і амплітуда віброакустичних коливань кореляційно пов'язані зі станом різального інструменту. Недоліком методу віброакустичної емісії є істотне ослаблення сигналу при його проходженні стиків пружної системи верстата. Тому, сигнал повинен зніматися безпосередньо з інструмента, що в деяких випадках є досить складно [3].

Метод контролю стану різального інструменту на основі вимірювання ЕРС є найбільш поширеним у виробництві та найбільш теоретично обґрунтованим [8]. Метод контролю на основі

електрорушійної сили дозволяє отримати інформацію із зони різання про стан різального інструмента безпосередньо шляхом вимірювання електрорушійної сили різання, що генерується в зоні ковзаючого контакту різального інструменту з оброблюваною деталлю. На даний час проведено дуже багато дослідів на основі яких сформовані відношення зміни технологічних режимів обробки та величини зносу різального інструменту на параметр електрорушійної сили, на постійну та змінну його складову, інтенсивність коливань в різних частотних діапазонах. Основна перевага методу полягає у можливості отримання інформації про стан інструменту під час безпосередньої обробки, що дозволяє оперативно реагувати на будь-які зміни і вчасно проводити підтримку та обслуговування інструменту. Розглянутий метод контролю стану різального інструменту на основі вимірювання електрорушійної сили різання дозволяє дуже точно оцінювати стан інструменту та може бути використаний в умовах автоматизованого виробництва [9].

Сигнал електрорушійної сили вважається одним з найбільш інформативних у контексті контролю стану різального інструменту. Цей сигнал містить в собі цінну інформацію про стан інструменту, зокрема про рівень зносу та характер його роботи. Інтенсивність та характер сигналу можуть бути зв'язані з різними параметрами різального процесу, такими як швидкість різання, тип матеріалу чи геометрія інструменту. Тому аналіз сигналу дозволяє не лише виявити наявний знос, але й зробити висновки щодо оптимальних параметрів різання та планування технологічних процесів виробництва.

**Постановка завдання.** Метою статті є створення автоматизованої системи контролю процесу обробки деталей в умовах гнучких виробничих систем, яка дає змогу забезпечити можливість безперервного моніторингу стану та оцінки зносу різального інструменту в реальному часі, використовуючи електрорушійну силу.

**Виклад основного матеріалу.** Підвищення ефективності обробки матеріалів різанням вимагає постійного вдосконалення методів контролю стану різального інструменту. Процес різання полягає у формуванні нової поверхні заготовки та витраті енергії на цей процес.

Процеси генерування відбуваються зазвичай за участю зовнішнього джерела, енергія якого витрачається на розрив електричних зв'язків, що існують між зарядами в речовині. При різанні металів такою зовнішньою енергією є механічна енер-

гія, що витрачається на процес відокремлення стружки від заготівлі.

Розподіл цих електронів за енергетичними станами зони провідності визначається розподілом станів у зоні та ймовірністю їх заповнення. Розподіл станів характеризується функцією щільності станів  $g(E_e)$ , яка виражається у вигляді [10]:

$$g(E_e) = 4\pi \left( \sqrt{\frac{2m_d}{h^2}} \right)^3 \cdot \sqrt{E_e} \quad (1)$$

де  $E_e$  – енергія електрона;  $m_d$  – ефективна маса щільності станів електронів;  $h$  – стала Планка.

Значення енергії Фермі визначається за формулою [10]:

$$E_\phi(o) = \frac{h^2}{2m_d} \left( \frac{3n_e}{8\pi} \right)^{2/3} \quad (2)$$

де  $n_e$  – концентрація електронів.

В загальному вигляді енергія електрона визначається так:

$$E_e = \frac{3}{5} E_\phi(o) + \frac{\pi^2 (kT)^2}{4 E_\phi(o)} \quad (3)$$

Перший доданок (3) характеризує середню енергію електрона при нульовій температурі і називається «нульовою» енергією, що має чисто квантову природу. «Нульова» енергія залежить від концентрації вільних електронів і ефективної маси щільності станів електронів. Виникаючи в процесі різання металів пластичні деформації збільшують щільність дислокацій на чотири порядки, при цьому змінюється величина ефективної маси щільності станів електронів, що і дозволяє деяким електронам набути енергію достатню для подолання потенційного бар'єру і вийти на межу розділу між інструментом і деталлю. Описаний процес – це процес електризації, що відбувається при різанні.

Електрорушійну силу різання можна виразити за допомогою наступної формули:

$$E = U \frac{S_r}{St} e^{-\frac{d}{V\tau_0}} \quad (4)$$

де  $U$  – контактна різниця потенціалів, В;  $d$  – середній діаметр зони контакту інструменту з деталлю, мм;  $\tau_0$  – постійна стружкоутворення, с.

Найбільш потужне джерело електрики локалізовано на задній поверхні інструменту, тому що електрична провідність на задній поверхні вище в порівнянні з провідністю на передній поверхні. Тому електрична напруга, що фіксу-

ється вимірювальним приладом, являє собою в основному електричну напругу, що виникає на задній поверхні різального інструменту при різанні. Дослідження [11] показують, що на задній поверхні інструменту присутній пружно-пластичний контакт, що виникає в результаті хвилі пружного відновлення. Фактична площа контакту для пружнопластичного виду контакту виражається залежністю:

$$S_r = \frac{N}{C_2 \sigma_m} + v \cdot (6\sigma)^{\frac{1}{v}} \cdot N^{\frac{v-1}{v}} \cdot \sigma_m^{\frac{v-1}{v}} \cdot I^2 \cdot h_3^{\frac{1}{v}} \left( \frac{t}{\sin \varphi} + r \cdot \tan \frac{\varphi}{2} + S \right) \quad (5)$$

Приймаючи форму контакту інструменту з деталлю у вигляді сфери, отримуємо  $C_1 \approx 3$ . Враховуючи, що:

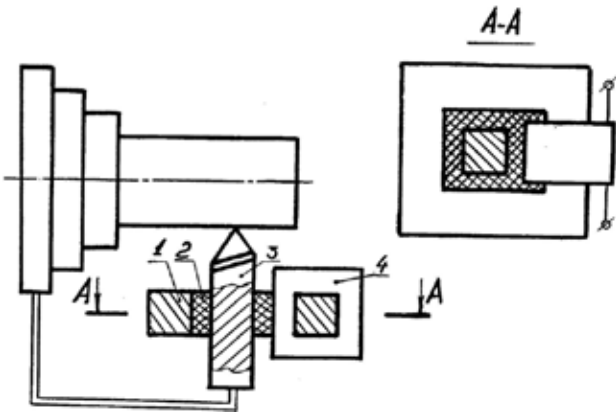
$$\frac{d}{V} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

де  $f$  – частота контакту мікроставів інструмента з деталлю. Підставляючи  $S$  із (6), можна виразити величину зносу різального інструменту по задній поверхні:

$$h_3 = \frac{N \left( \frac{E}{U} \cdot \frac{St}{N} e^{-\frac{1}{f\tau_0}} - \frac{1}{\sigma_m} \right)^v}{k_1^v \left( \frac{t}{\sin \varphi} + r \cdot \tan \frac{\varphi}{2} + S \right) \sigma_m^{v+1} \cdot I^{2v}} \quad (7)$$

Змінна складова ЕРС різання характеризує коливання енергії на контактних поверхнях різального інструменту та деталі. Величина і характер зміни змінної складової електрорушійної сили різання залежать від тих всіх факторів, які впливають на величину зносу різального інструменту. До таких факторів відносяться: фізико-механічні властивості інструменту та деталі, а також їх неоднорідність; тиск; фактична площа торкання; швидкість відносного руху; вібрації; стан контактуючих поверхонь; процеси схоплювання та руйнування тощо [12].

Пристрій для вимірювання змінної складової електрорушійної сили різання можна подати у такому вигляді (Рис. 1). Магнітний тороїдальний феритовий сердечник 1 встановлюють на ізоляційні прокладки 2 на державку 3 різального інструменту. Котушка обмотки 4 встановлена на іншому кінці магнітного сердечника 1. Змінна складова електрорушійної сили  $E$ , що виникає в процесі різання, викликає протікання в обробній системі змінного струму, при цьому обробну систему можна представити у вигляді одного витка



**Рис. 1. Пристрій для вимірювання змінної складової електрорушійної сили. 1 – феритовий сердечник, 2 – ізоляційні прокладки, 3 – державка різального інструменту, 4 – обмотка**

первинної обмотки. Перемінний струм, що протікає по різальному інструменті 3 наводить змінний магнітний потік  $\Phi$  в сердечнику 1. При вимірюванні використовуємо режим холостого ходу трансформатора струму. У цьому режимі магнітний потік  $\Phi$  збільшується внаслідок відсутності струмів розмагнічування, що у свою чергу різко збільшує електрорушійної сили  $E_\phi$  у вторинній обмотці.

Магніторушійна сила в первинній обмотці виявляється у вигляді:

$$F_M = I_1 W_1 \quad (8)$$

де  $I_1$  – струм, що тече по різальному інструменту,  $W_1$  – число витків в первинній обмотці ( $W_1 = 1$ ).

Магнітний опір сердечника  $R_M$  визначають за формулою:

$$R_M = \frac{l_M}{\mu' \cdot S_M} \quad (9)$$

де  $l_M$  – довжина ділянки магнітного ланцюга;  $S_M$  – площа перетину магнітопроводу;  $\mu'$  – магнітна проникність матеріалу сердечника.

Магнітний потік  $\Phi_M$  в сердечнику рівний

$$\Phi_M = \frac{F_M}{R_M} = \frac{I_1 \cdot W_1 \cdot S_M \cdot \mu'}{l_M} \quad (10)$$

ЕРС, що виникає у вторинній обмотці:

$$E_\phi = \frac{d\Phi_M}{d\tau} W_2 \quad (11)$$

де  $W_2$  – число витків у вторинній обмотці.

Підставляючи (8), (9), (10) в (11) отримуємо:

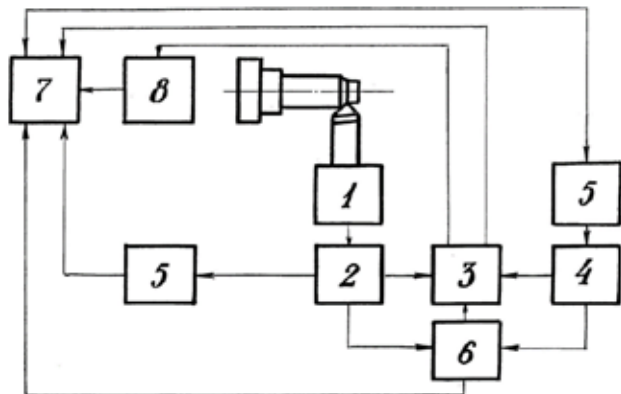
$$E_\phi = 2\pi \cdot W_2 \cdot \mu' \cdot f_M \cdot \frac{S_M}{l_M} \cdot I_1 \quad (12)$$

Аналіз (12) показує, що електрорушійна сила  $E_\phi$ , що виникає у вторинній обмотці залежить, з одного боку, від конструктивних параметрів сердечника та числа витків вторинної обмотки, а з іншого боку від сили струму, що протікає по різці, та частоти зміни магнітного потоку. Величина частоти зміни магнітного потоку пропорційна частоті зміни струму і відповідно електрорушійної сили різання. Отже, вимірювання у вторинній обмотці дозволить виміряти змінну складову електрорушійної сили [6].

Автоматизована система контролю процесу обробки деталей складається з пристрою 1 (рис. 2) вимірювання змінної складової електрорушійної сили різання який підключений через підсилювач 2 електричних сигналів до датчика 3 дотику оброблюваної деталі, датчику 5 поломки і датчику зносу 6 різального інструменту. Перший вихід датчика 3 дотику, а також виходи датчика 5 поломки і 6 датчика зносу різального інструменту приєднані до блоку 7 управління приводом подачі металорізального верстата. Другий вихід датчика 3 дотику підключений до входу блоку 8 «кінець введення» пристрою числового програмного управління, який у свою чергу підключений до блоку управління 7 приводом подачі верстата.

Датчик поломки різального інструменту складається з логічної комірки, тригера і блоку управління пороговим значенням. Сигнал поломки формується при досягненні заданого рівня сигналу на пристрої 1. В даному випадку з виходу датчика надійде на вхід блоку 7 управління приводом подачі та блоку 8 «кінець введення» пристрою ЧПК коли рівень сигналу з виходу пристрою 1 зросте вдвічі протягом 0,04 с.

Датчик зносу різального інструменту складається з операційного підсилювача, підключе-



**Рис. 2. Блок-схема автоматизованої системи контролю процесу обробки деталей на основі електричних сигналів**

ного через діод і резистор до накопичувального конденсатора, компаратора і цифро-аналогового перетворювача. На виході датчика зношування формуються сигнали за умови досягнення різальним інструментом величини критичного зношування. У датчику зношування відбувається порівняння інтегрального рівня сигналу, накопиченого на конденсаторі за час одного проходу з рівнем сигналу, заданого на цифро-аналоговому перетворювачі і відповідного величини критичного зношування різального інструменту.

Робота системи контролю обробки деталей. При торканні різального інструменту з деталлю з виходу датчика з дотику подають сигнал на вхід блоку 7 управління приводом подачі верстата, де здійснюється автоматичне перемикавання подачі з прискореної робочої. У момент виходу різального інструменту з деталі відбувається автоматичне перемикавання з подачі на прискорену. Це дозволяє скоротити допоміжний час обробки деталей на верстатах з ЧПК.

На початку обробки система перевіряє наявність контакту пари «інструмент-деталь», якщо контакту не відбувається, то це свідчить про відсутність чи поломку інструменту, система аварійно завершує свою роботу.

Після реєстрації дотику система проводить вимірювання зносу різального інструменту. При досягненні інструментом критичного зносу система, для попередження браку, аварійно завершує свою роботу. У випадку коли знос інструменту знаходиться в межах норми відбувається поправка на

рівень зносу інструменту, що дозволяє підвищити точність обробки [13]. Далі програма перевіряє чи є процес обробки закінченим, якщо ні – система проводить повторну діагностику з певною періодичністю.

#### Висновки.

1. На основі теоретичних досліджень фізики процесу обробки деталей встановлений взаємозв'язок між видами зносу та електричними сигналами, які виникають в процесі обробки, а також основні причини виникнення електричних сигналів.

2. У роботі проведено критичний аналіз різних методів контролю зносу інструменту та їх ефективності в умовах виробництва. В результаті був обраний метод на основі електрорушійної сили, як найефективніший.

3. Розроблена математична модель, що заснована на вимірюванні змінної складової електрорушійної сили, що дозволяє оцінювати рівень розмірного зносу різального інструменту в процесі обробки.

4. Розроблений новий метод вимірювання змінної складової вимірювання електрорушійної сили без конструктивних змін верстата та без електричної ізоляції інструмента та деталі.

5. Розроблена автоматизована система контролю процесу обробки деталей на основі електричних сигналів, що дозволить підвищити точність обробки деталей та зменшити кількість бракованих деталей, що дасть можливість підвищити продуктивність та знизити собівартість виробництва.

#### Список літератури:

1. Остаф'єв В.О., Тимчик Г.С., Шевченко В.В. Адаптивна система управління. Механізація і автоматизація управління. Київ, 1983. С. 18-20.
2. Проць Я.І. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. /Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Лящук – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с.
3. Мазур М., Внуков Ю., Добровський В., Залого В. (2010). Основи теорії різальних матеріалів: підручник. Львів: Новий Світ-2000. ISBN 978-966-418-105-8.
4. Sharma V. S., Sharma S. K., Sharma A. K. Cutting tool wear estimation for turning // Journal of Intelligent Manufacturing. 2007. Vol. 19. P. 99-108.e
5. V. Tsapenko, M. Tereshchenko, G. Tymchik, S. Matvienko, V. Shevchenko. Analysis of Dynamic Load on Human Foot.// 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 400-404, doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088788.
6. Шевченко В.В., Капінос І.В., Грабовський Д.О. Система контролю процесу обробки деталей в умовах «безлюдної технології» / В.В. Шевченко, І.В. Капінос, Д.О. Грабовський // Прогресивні технології та прилади. м. Луцьк. 2011. № 1. С. 223-231.
7. Шевченко В.В., Олінійчук А.І., Засць С.С. Аналіз акустичної емісії в процесах механічної обробки з використанням вейвлет-пакетів. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Новое в современных технологиях. ISSN 2079-5459. – Харків: Вид-во НТУ «ХПІ», 2017. № 7 (1229). С. 233-238.
8. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design (2nd ed.) Cambridge. 2012. 382 p.

9. Matvienko S., Shevchenko V., Tereshchenko M., Kravchenko A., Ivanenko R. (2020). Determination of composition based on thermal conductivity by thermistor direct heating method. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 19-29. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.193429.
10. Stephenson D. A., Agapiou J. S. Metal Cutting Theory and Practice. 3-тє вид. Missouri : CRC Press, 2021. 976 с. ISBN-13<sup>†</sup>: †978-1466587533
11. Bello D. J., Leckie F. A. Strength and Stiffness of Engineering Systems. Boston, MA : Springer US, 2009. URL: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-49474-6> (дата звернення: 12.02.2024).
12. Groche P., Nitzsche G. Influence of temperature on the initiation of adhesive wear with respect to deep drawing of aluminum-alloys. Journal of Materials Processing Technology. 2007. Т. 191, № 1-3. С. 314–316. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.098> (дата звернення: 12.02.2024).
13. Шевченко В.В., Капінос І.В., Грабовський Д.О. Система діагностики різального інструменту при обробці деталей на верстатах з ЧПК / В.В. Шевченко, І.В. Капінос, Д.О. Грабовський // Проблеми легкої і текстильної промисловості України. Херсон, 2011. № 1. С. 203-206.

### **Pylypenko V.O., Shevchenko V.V., Humeniuk T.S. AUTOMATED SYSTEM FOR CONTROL OF THE MACHINING PROCESS BASED ON ELECTRICAL SIGNALS**

*The work justifies the relevance of creating an automated system for controlling the machining process in flexible manufacturing systems. The implementation of an automated system in production will increase the accuracy of parts machining and reduce the number of defective parts, thus increasing productivity and reducing production costs. A critical analysis of machining process control systems has been conducted, showing that the most effective method is control based on measuring electrical signals, particularly the variable component of electromotive force. The studies have shown that the magnitude and nature of the variable component of electromotive force depend on the physico-mechanical properties of the tool and workpiece materials, the actual contact area, as well as friction and wear processes. Based on the theoretical research, a correlation between electrical signals, particularly the constant and variable components of electromotive force, and the level of tool wear has been established. The main causes of generating electrical signals have been identified, including exoelectronic emission associated with plastic deformation. A new method for measuring the variable component of electromotive force without structural changes to the machine tool or electrical insulation of the tool and workpiece has been proposed. A mathematical model of tool wear based on measuring the variable component of electromotive force has been developed. A block diagram of the automated system for controlling the machining process based on electrical signals has been developed. Key elements and the operation principle of the system have been considered. A device for measuring the variable component of electromotive force has been proposed. A system for controlling the machining process on CNC machines in flexible manufacturing systems has been developed, allowing for the detection of critical tool wear and breakage, as well as performing dimensional adjustments directly on the machine tool.*

**Key words:** processing control, automated manufacturing, flexible production systems, cutting tool wear, electrical signals, variable component of electromotive force, tool breakage.