

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-03>
УДК 004.8 : 681.5.09

Пальчевський Б. О.
д-р. техн. наук, професор
ORCID: 0000-0002-4000-4992
Герасимчук Д. Ю.
магістрант

Луцький національний
технічний університет / Україна

АВТОМАТИЧНА ДІАГНОСТИКА СТАНУ СВЕРДЛА ЗА ДЕКІЛЬКОМА ДІАГНОСТИЧНИМИ ОЗНАКАМИ

Анотація: ключовою проблемою в машинобудуванні є прогнозування зносу інструменту в режимі реального часу. Традиційні методи покладаються на консервативну заміну інструменту, що призводить до передчасної заміни або надмірного зносу інструменту, а також до підвищених простоїв виробництва. Ручна оцінка стану свердла займає багато часу. Для зменшення простою необхідно процес діагностування стану свердла в виробничих умовах проводити автоматично, з високою точністю. Системи автоматичного моніторингу стану інструменту продемонстрували великий потенціал для виявлення та прогнозування зносу інструменту, зниження ризику поломки інструменту та оптимізація інтервалів зміни інструменту, однак точність прогнозу не є завжди достатньою. У цьому дослідженні представлена автоматична система для прогнозування терміну служби інструменту в режимі реального часу, яка допомагає вирішити це обмеження шляхом інтеграції кількох контрольних модулів. Система прогнозування включає встановлені на верстаті модулі прямого контролю сигналів сили подачі і споживаної потужності різання, модуль інтеграції сигналів шляхом їх підключення для управління даними в режимі реального часу та модуль обробки даних для прогнозування зносу інструменту. В останньому модулі на основі цих сигналів генерується інтегральний показник зносу свердла, ступінь наближення якого до допустимого значення зносу визначає стан свердла як «придатний до роботи» або «непридатний до роботи». Очевидно, що тут пропонується підхід агрегування моделей у машинному навчанні, коли кілька моделей об'єднуються для отримання кращих результатів, ніж дає будь-яка окрема модель з метою підвищити точність, стабільність і узагальнюючу здатність системи діагностування. В роботі використана агрегована модель прогнозування, заснована на використанні сигналу осьової сили різання та сигналу споживаної шпинделем потужності для контролю зносу інструменту.

Ключові слова: спіральне свердло, моніторинг стану інструменту, знос свердла, датчик потужності, датчик осьової сили свердління.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Механічна обробка свердлінням широко використовується в сучасному

промисловому виробництві. Продуктивність процесу обробки тісно зв'язана зі станом інструменту [1] через його постійне зношування. Через механічний, термічний та хімічний вплив заготовки свердло постійно затуплюється під час обробки матеріалу. Знос свердла – це поступовий процес, який відбувається на задній поверхні свердла через тісний контакт та підвищені температури в місці контакту інструменту з заготовкою. Знос визначає ефективний термін служби інструменту і, як наслідок, витрати на виробництво. Дослідження показують, що ріжучі інструменти в промисловості часто використовуються лише для 50-80 % від їх ефективного терміну служби [2, 3]. Однак навіть за постійних умов різання руйнування свердла є стохастичним процесом.

Однак, під час обробки лезо інструмента зношується, а збільшення поверхні взаємного контакту погіршує умови різання, призводить до зростання споживаної потужності і осьової сили різання. Втрата ріжучих властивостей відбувається через зміни геометрії леза, що спричинено механічними, термічними, електричними та хімічними факторами. Основні проблеми при роботі свердла, які потрібно діагностувати:

1. Затуплення різальних кромки, що зменшує ефективність різання і підвищує силу опору.
2. Перегрів свердла і його вібрація, викликані підвищеним тертям через знос.
3. Тріщини або поломка свердла, що може призвести до аварії.

Інтерес до автоматичної діагностики і моніторингу ріжучих інструментів неухильно зростає завдяки поширенню гнучкої автоматизації виробництва [4, 5]. Галузь діагностики несправностей, широко відома як технічне обслуговування на основі стану, охоплює ряд принципів технічного обслуговування, які використовують різні методи для оцінки поточного стану обладнання та розробки графіків технічного обслуговування. Ця процедура включає регулярну або постійну перевірку стану обладнання. Дослідниками було визначено основні параметри, які характеризують стан свердла при роботі і можуть бути використані для його контролю, а саме: вібрація, температура, акустична емісія, сила різання та потужність споживання шпинделю. Однак, на сигнали моніторингу стану свердла впливають шум та інші специфічні властивості виробничого середовища. Це вимагає вдосконалення існуючих рішень при створенні систем автоматичного діагностування стану свердла з точки зору підвищення точності контролю діагностичних параметрів.

При створенні системи автоматичного діагностування стану свердла необхідно вибрати датчики для збору різних сигналів. Після збору сигналів моніторингу свердла використовується методологія вилучення ознак для вибору стану свердла, а саме:

- свердло, яке ще перебуває у хорошому стані та може бути далі використані у виробничому процесі,
- свердло, класифіковане як непридатне до використання, яке слід негайно замінити.

Найпростішим методом діагностики в усіх системах моніторингу є використання заздалегідь визначених меж, тобто якщо певний параметр в

аналізі досягає певної верхньої або нижньої межі, це свідчить про несправність інструменту або зношений інструмент. Ці типи фіксованих меж часто використовуються оператором-людиною, а також вони використовуються в системах моніторингу та формують основу експертних систем на основі правил. Хоча ручна оцінка стану свердла можлива, вона займає багато часу та перериває виробництво, що може призвести до простою. Щоби уникнути цих простоїв необхідно автоматизувати процес діагностування стану свердла при його експлуатації.

Основні мета такої системи:

- моніторинг зносу, тобто визначення ступеня зносу ріжучої кромки свердла в реальному часі для оптимізації процесу механічної обробки;
- прогнозування поломки, тобто попередження про можливу поломку інструменту, щоб уникнути простоїв обладнання та пошкодження заготовок;

Узагальнюючи визначимо систему автоматичної діагностики різального інструменту як поєднання технічних засобів, методів і програмного забезпечення для оцінки стану інструменту під час його експлуатації, виявлення зносу, пошкоджень або інших відхилень, що можуть вплинути на якість обробки та продуктивність обладнання, а також можливість прогнозування залишкового ресурсу свердла. Система автоматичної діагностики свердла – це приклад конкретного застосування. Переваги такої системи:

- зменшення простоїв свердлильного верстату через своєчасне виявлення проблем зносу свердла;
- підвищення якості отворів (точність розмірів і чистота поверхні);
- економія ресурсів завдяки уникненню поломок і непланових простоїв верстату.

У цій роботі представлено цілісний підхід до діагностування та моніторингу стану свердла, що керується даними. Для підвищення точності системи діагностування в роботі використана агрегована модель моніторингу, заснована на об'єднанні сигналу осьової сили різання та сигналу споживаної шпинделем потужності для контролю зносу інструменту та генерації ознак для остаточної класифікації стану свердла.

СУЧАСНИЙ СТАН ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ СВЕРДЛА

Метою цього дослідження є розробка та оцінка агрегованої моделі зносу свердла в процесі свердління, яка забезпечує точність моніторингу стану свердла достатню, щоб виявити кінець терміну служби інструменту до того, як його поломка стане ймовірною.

На жаль, у традиційних методах визначення зносу інструменту є недоліки, бо ці методи або вимагають зняття інструменту з обладнання, або використання складних та дорогих методів моніторингу зносу інструменту, або неточно відображають знос інструменту.

Підходи до моніторингу процесів, що керуються даними, були розглянуті в численних дослідженнях. В процесі моніторингу сигнали від різних датчиків служать вхідними даними для аналізу. При свердлінні, найчастіше використовують сигнали споживаної потужності шпинделю, осьової сили

різання, крутного моменту, температури, акустичної емісії або вібрації при обробці тощо [6]. Типові джерела даних, які застосовуються в таких системах, є:

- вібраційний аналіз (використання акселерометрів для вимірювання вібрацій, які змінюються залежно від стану свердла);
- акустична емісія (моніторинг звукових хвиль, що виникають під час різання, для виявлення мікротріщин або зносу);
- силові датчики (вимірювання зусиль різання, які зростають зі зносом інструменту);
- температурний контроль (використання термодатчиків для оцінки нагріву свердла).

Серед цих джерел даних струм від споживаної потужності шпинделя та осьова сила різання при свердлінні зокрема мають хороший потенціал для широкого промислового застосування завдяки їх невисокій вартості і простоті монтажу. У найсучасніших системах керування, ці вимірювання можна отримати безпосередньо на верстаті без необхідності додаткової модернізації дорогих датчиків [7]. Відомі чисельні приклади вимірювання зміни осьової сили в залежності від зносу свердла [8, 9]. Одним із найпоширеніших методів контролю зносу інструменту є контроль споживаної верстатом електроенергії, тобто потужності різання на шпинделі [10]. Потужність на шпинделі можна виміряти за допомогою відносно недорогого датчика. Потужність шпинделя корелює із силами, що діють на інструмент (точніше, тангенціальною складовою), оскільки, коли інструмент зношується, сили зростають. Згідно з патентом США, чиста потужність отримується шляхом віднімання потужності холостого ходу, споживаної шпинделем, що обертає інструмент без контакту з деталлю, із загальної потужності, споживаної під час роботи інструменту.

Найбільш поширеним є спосіб визначення стану різального інструменту, що базується на різанні як гострим, так і тупим інструментом, щоб визначити межі зміни потужності шпинделя [11]. Одна з головних проблем із моніторингом споживання електроенергії двигуном полягає в тому, що в верстаті іноді виникають скачки навіть за нормальних умов. Скачки потужності можуть помилково вказувати на те, що інструмент зношений. Однак, якщо поріг збільшити, щоб запобігти помилковим сигналам, зношений інструмент може залишитися непоміченим. Окрім того, застосування моніторингу стану інструменту на основі процесу навчання не вирішує проблему повністю, оскільки є корисним тільки для умов обробки, якщо процес не змінюється, наприклад, та сама деталь виготовляється тим самим інструментом постійно.

МЕТОДИКА ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ СВЕРДЛА

Автоматична діагностика скорочує час простоїв свердлильного обладнання і подовжує корисний час використання свердла. На відміну від однієї лише потужності шпинделя, на сигнал якої впливають багато виробничих факторів, особливо змінні умови різання, усереднений показник зносу свердла менше залежить від змінних умов різання і, таким чином, забезпечує більш точне вимірювання зносу інструменту.

Блок-схема пристрою показана на рисунку 1, його загальний вигляд подано

на рисунку 2, а схема підключення елементів системи діагностування – на рисунку 3.

Пристрій для автоматичного діагностування стану свердла складається з наступних компонент (рис. 1).

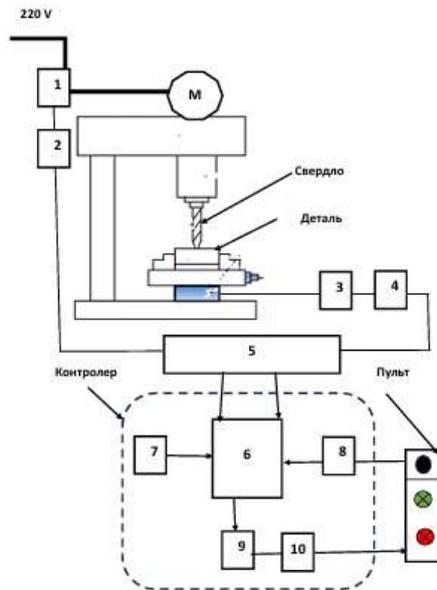


Рисунок 1 – Пристрій для діагностування стану свердла

1 – датчик струму шпинделя; 2 – підсилювач; 3 – датчик вимірювання осьової сили різання; 4 – підсилювач; 5 – АЦП; 6 – блок оцінки розміру зносу; 7 – база даних поправочних коефіцієнтів; 8 – блок значень діагностичних сигналів нового свердла; 9 – блок прогнозування зносу свердла; 10 – блок формування сигналів стану свердла



Рисунок 2 - Пристрій для діагностування

Вимірювання сигналу осьової сили різання здійснюється датчиком 3, сигнал від якого через підсилювач 4 надходить на вхід аналого-цифрового

перетворювача (АЦП) 5. Інший діагностичний сигнал потужності різання отримують вимірюванням від датчика струму 1, через підсилювач 2, який також надходить на вхід АЦП. Подальша обробка та аналіз вимірних параметрів проводиться за допомогою контролера ESP32 або іншої мікроЕОМ, до складу якої входять: блок оцінки розміру зносу 6, де, на підставі даних про значенні потужності різання і осьової сили, розраховується значення усередненого зносу. Значення зносу визначається шляхом порівняння вимірних сигналів обох діагностичних параметрів з їх значеннями для нового свердла, заданими в блоці 8 при встановленні нового інструменту. В блоці 7 розміщені значення поправочних коефіцієнтів, отримані при навчанні САК. В блоці 9 відбувається моделювання процесу обробки, за допомогою якого обчислюється залишкова стійкість інструменту, а також проводиться прогнозування зносу інструменту, на підставі цих даних в блоці 10 формуються керуючі сигнали, що візуалізуються на пульті або моніторі. Випробування розробленої системи діагностування стану свердла в процесі свердління здійснювалось на свердлильному верстаті, оснащеному системою діагностування на базі контролера (рис. 3). В рамках проекту було спроектовано недорогий пристрій для безперервного контролю стану свердла. Прототип пристрою, призначений для встановлення безпосередньо на корпус свердлильного верстату, був створений з використанням платформи ESP32 SoC (Espressif Systems, Шанхай, Китай) [13] і динамометр для вимірювання осьової сили на основі тензодатчиків [14], поряд з простим користувальницьким інтерфейсом, що складається з двох світлодіодних індикаторів і кнопки. Модуль на основі ESP зв'язується з динамометром для вимірювання осьової сили через шину I2C. Живлення пристрою здійснюється від силової установки.

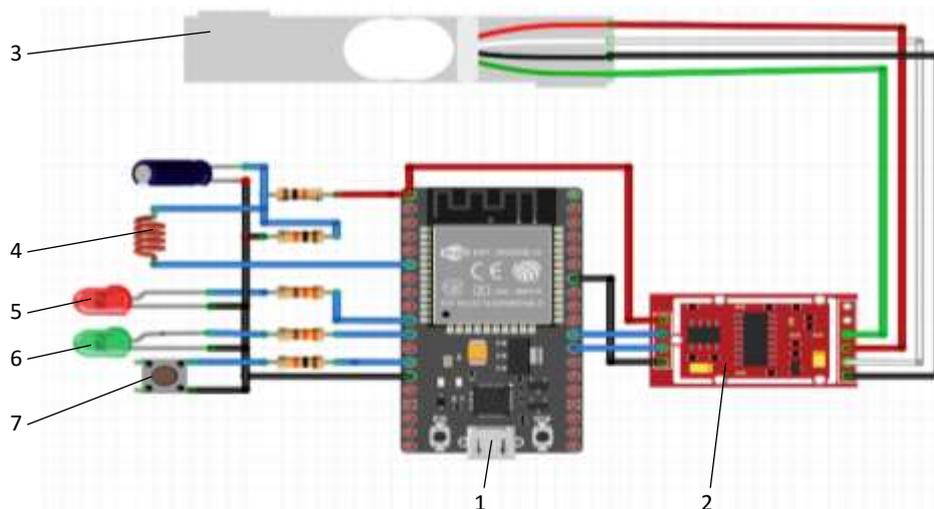


Рисунок 3 – Схема підключення елементів системи діагностування до контролера: 1 – плата TSP32; 2 – плата підсилення HX711; 3 – тензорезистивний датчик Zemic L6D; 4 – датчик змінного струму SCT013; 5, 6 – LED-діоди; 7-тактова кнопка скидання

Процес автоматичного діагностування включає наступні етапи:

1. Вимірювання діагностичних параметрів стану свердла у реальному часі. Під час свердління датчики безперервно фіксують діагностичні параметри (F_z – осьова сила, P – споживана потужність) в зоні обробки. Ці дані передаються до блоку збору даних і до їх обробки.

2. Порівняння з еталонними значеннями. Система має набір попередньо визначених порогових значень, які відповідають нормальному стану свердла (наприклад, для нового свердла крутний момент може бути 10 Н·м, а при зносі зростати до 15 Н·м – це сигналізує про проблему).

3. Аналіз відхилень. Якщо виміряні значення перевищують поріг (наприклад, на 20-30% від базового), система визначає, що свердло зношене або пошкоджене. Можливе використання алгоритму, який враховує не лише абсолютні значення, а й швидкість їх зміни (наприклад, різке зростання осьової сили).

4. Реакція системи. Автоматичне зупинення верстата або попередження оператора через звуковий чи візуальний сигнал.

Результати діагностики відображаються оператору через інтерфейс ((зелений – норма, червоний – критичний стан).

Збір і обробка даних здійснюється наступним чином. Сигнали від датчиків передаються до системи збору даних. Дані обробляються в реальному часі з використанням методів цифрової обробки сигналів, щоб виділити характерні ознаки стану інструменту. Стан інструменту визначається на основі інтегрального показника зносу, розрахованого за допомогою постійного моніторингу двох діагностичних характеристик (споживання електроенергії та значення осьової сила різання). Метод заснований на моделі процесу свердління, що ґрунтується на фізиці процесу різання, яка дозволяє калібрувати залежності кожного з обох діагностичних параметрів від величини зносу для різних умов різання. Потужність шпинделя і осьова сила свердління як діагностичні параметри моделі процесу утворюють інтегральний (узагальнений) діагностичний параметр і є легкодоступними для вимірювань. На відміну від однієї лише потужності шпинделя, на яку впливають багато факторів, особливо змінні умови різання, інтегральний параметр моделі зносу свердла менше залежить від змінних умов різання і, таким чином, забезпечує більш точне вимірювання зносу інструменту. Два параметри моделі процесу змінюються по-різному залежно від механізму зношування інструменту. Інтегральний показник зносу забезпечує більш точну діагностику зносу інструменту.

Спосіб діагностування стану свердла під час виконання свердління реалізують наступним чином. При роботі обладнання здійснюють постійний технічний моніторинг стану свердла, під час якого фіксують значення двох діагностичних параметрів – величину споживаної потужності і осьову силу свердління. Для визначення стану свердла в процесі його роботи необхідно використовувати залежності P і F_z від ступеню зносу свердла W , відомі з літературних джерел [12]. Відомі залежності зростання споживаної потужності свердління P і осьового зусилля при свердління F_z від ступеню зносу свердла мають вигляд:

$$P = P_0(1 + k_p W^n), \quad F_z = F_{z0}(1 + k_f W^m) \quad (1)$$

Де P_0 , F_{z0} – споживана потужність і осьова сила при свердління новим свердлом,

W – ступінь зносу свердла, наприклад, ширина зношеної фаски на задній поверхні свердла (мм),

k_p , n , k_f , m – емпіричні коефіцієнти, що залежать від матеріалу свердла і заготовки.

Для практичного визначення значень емпіричних коефіцієнтів k_p , n , k_f , m необхідно здійснити навчання системи діагностики із заданими матеріалами свердла і заготовки. Тоді їх значення можна вважати постійними для подальшої роботи свердла. Для практичного визначення значення цих коефіцієнтів проведемо лінеаризацію залежностей. Спочатку здійснимо перетворення залежності наступним чином:

$$\frac{P}{P_0} - 1 = k_p W^n, \quad \frac{F_z}{F_{z0}} - 1 = k_f W^m, \quad (2)$$

або

$$\frac{\Delta P}{P_0} = k_p W^n, \quad \frac{\Delta F_z}{F_{z0}} = k_f W^m, \quad (3)$$

де ΔP – різниця споживаної потужності свердління зношеним та новим свердлом,

ΔF_z – різниця осьової сили різання при свердлінні зношеним та новим свердлом.

Прологарифмуємо ці вирази, щоби отримати лінійну залежність, зручну для проведення навчання системи діагностики:

$$\ln \frac{\Delta P}{P_0} = \ln k_p + n \cdot \ln W, \quad \ln \frac{\Delta F_z}{F_{z0}} = \ln k_f + m \cdot \ln W. \quad (4)$$

Режим навчання системи діагностування. В режимі навчання здійснюється калібрування математичної моделі і визначення емпіричних коефіцієнтів моделі. Система працює в «режимі навчання», в якому експериментально визначають емпіричні коефіцієнти залежності кожного з діагностичних показників від величини зносу свердла для заданого матеріалу заготовки. Розрахунок емпіричних коефіцієнтів в цих залежностях для заданого матеріалу заготовки і свердла може бути здійснено шляхом визначення значень двох точок в отриманих логарифмуванням лінійних залежностей.

Для цього здійснюють вимірювання величини зносу свердла W на задній поверхні свердла (рис.4).

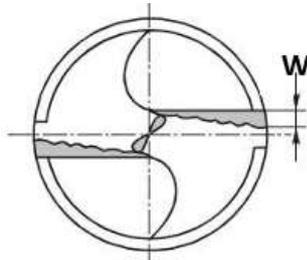


Рисунок 4 – Вимірювання зносу

Для нового свердла із значенням зносу 0 мм визначають величину споживаної потужності і осьової сили. Ці значення подають в блок збору даних 7 а з нього в блок обробки даних 8 (рис. 1). Наприклад, при здійсненні свердління новим спіральним свердлом діаметром 10 мм деталі із сталі 30 отримано датчиками 5, 6 системи діагностування значення $P_0 = 300$ Вт, $F_{z0} = 450$ Н. При першому досліді робота свердла проводилася до значення споживаної потужності $P_1 = 450$ Вт, причому осьове зусилля склало $F_{z1} = 600$ Н. Заміряна величину зносу свердла склала $W = 0,2$ мм. При другому досліді робота свердла проводилася до значення споживаної потужності $P_2 = 650$ Вт, причому осьове зусилля склало $F_{z2} = 800$ Н. Заміряна величину зносу свердла склала $W = 0,5$ мм. Для обох дослідів визначили значення споживаної потужності P_1 і P_2 та значення осьової сили F_{z1} і F_{z2} . Тоді отримаємо для кожного з параметрів системи із 2-х рівнянь.

Для визначення залежності приросту споживаної потужності від величини зносу свердла 0,2 мм і 0,5 мм отримаємо систему із 2-х рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \ln \frac{450 - 300}{300} &= \ln k_p + n \cdot \ln 0,2 \\ \ln \frac{650 - 300}{300} &= \ln k_p + n \cdot \ln 0,5 \end{aligned} \right\}; \left. \begin{aligned} -0,693 &= \ln k_p + n(-1,609) \\ 0,154 &= \ln k_p + n(-0,693) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Розв'язання системи цих рівнянь дає значення: $n = 0,925$; $k_p = 2,52$. Тоді залежність приросту споживаної потужності від величину зносу свердла для заданого матеріалу набере вигляду:

$$\frac{\Delta P}{P_0} = 2,52 W^{0,925}. \quad (6)$$

Для визначення залежності приросту осьової сили від величини зносу свердла 0,2 мм і 0,5 мм також отримаємо систему із 2-х рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \ln \frac{600 - 450}{450} &= \ln k_f + m \cdot \ln 0,2 \\ \ln \frac{800 - 450}{450} &= \ln k_f + m \cdot \ln 0,5 \end{aligned} \right\}; \left. \begin{aligned} -1,100 &= \ln k_f + m(-1,609) \\ -0,251 &= \ln k_f + m(-0,693) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Розв'язання системи цих рівнянь дає значення: $m = 0,927$; $k_F = 1,48$. Тоді залежність приросту осьової сили від величину зносу свердла для заданого матеріалу набере вигляду:

$$\frac{\Delta F}{F_{z0}} = 1,48W^{0,927}. \quad (8)$$

Після здійснення калібрування, яке дозволяє визначити значення параметрів k_P , k_F , n , m в процесі свердління певного матеріалу, при подальшій обробці деталей постійно контролюють значення споживаної потужності і осьової сили свердління, а по отриманих виразах в блоці обробки даних 8 розраховують величини зносу свердла по кожному з контрольованих параметрів (споживана потужність і осьова сила), тобто W_P , W_F , далі розраховують їх усереднене (інтегроване) значення і порівнюють його з значенням допустимого зносу. В залежності від степеню наближення до допустимого значення зносу система діагностування видає сигнал про продовження роботи (спрацьовує зелена лампочка 9 В на панелі, рис. 1) чи про заміну свердла (спрацьовує червона лампочка 9 В, рис. 1). При визначенні стану свердла також використовують додаткові показники, які проявляються при постійному моніторингу свердління, наприклад, для контролю процесу свердління критичнішим параметром є різке зростання осьової сили, що може призвести до руйнування свердла або втрати якості обробки.

Приклад визначення стану свердла. Нехай за результатом вимірювання діагностичних параметрів при свердлінні отримано значення споживаної потужності 670 Вт і значення осьової сили 840 Н. Враховуючи показники нового свердла ($P_0 = 300$ Вт, $F_{z0} = 450$ Н) визначимо значення зносу за вищенаведеними виразами.

Значення зносу свердла за показниками приросту споживаної потужності:

$$\frac{670 - 300}{300} = 1,233 = 2,52W^{0,925},$$

$$W^{0,925} = 0,49, \quad W = 0,49^{\frac{1}{0,925}} \approx 0,454.$$

Значення зносу свердла за показниками приросту осьової сили:

$$\frac{840 - 450}{450} = 0,867 = 1,48W^{0,927},$$

$$W^{0,927} = 0,586, \quad W = 0,586^{\frac{1}{0,927}} \approx 0,546.$$

Тоді у випадку рівномірного впливу обох діагностичних параметрів на результат визначення стану свердла при свердлінні матеріалу визначимо величину зносу так:

$$W = \frac{W_P + W_F}{2} = \frac{0,454 + 0,546}{2} = 0,5 \text{ (мм)}, \quad (9)$$

де W_P , W_F – знос свердла, визначений за значенням приросту споживаної потужності і приросту осьової сили відповідно.

РЕЗУЛЬТАТИ ПРАКТИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ СВЕРДЛА І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для досліду використовувалось свердло діаметром 8 мм, яким проводилось свердління заготовки із сталі 30 товщиною 10 мм. Вимірювання зносу здійснювалось по задній поверхні свердла за схемою, наведеною на рисунку 4.

Спочатку визначалась потужність різання P_0 і осьова сила різання F_{z0} для нового свердла із зносом $W = 0$. Для проведених дослідів ці значення склали – $P_0 = 200$ Вт, $F_{z0} = 370$ Н. Далі проводилося навчання системи. Для цього визначалися значення ΔP і ΔF_z для вимірних зносів $W = 0,2$ мм і $W = 0,7$ мм. Далі за наведеною вище методикою визначались значення коефіцієнтів у виразі для залежності зносу від приросту потужності і приросту осьової сили при свердлінні заданого матеріалу – сталі 30. Вони склали відповідно:

$$n = 1,496; k_p = 0,307; m = 0,76; k_f = 0,09.$$

Подальші досліді проводилися для нового свердла із використанням визначених коефіцієнтів до повного зношення свердла. Результати наведені в таблиці і на графіках (рис. 5-7).

Таблиця 1 – Результати використання системи діагностування свердла (умови роботи: матеріал заготовки – сталь, діаметр свердла 8 мм, подача 0,024-0,032 мм/об, швидкість обертання 620 об/хв при отриманих коефіцієнтах $n = 1,496; k_p = 0,307; m = 0,76; k_f = 0,09$)

№ досліду	Приріст потужності ΔP , W	Приріст осьової сили ΔF_z , Н	Величина зносу по потужності W_P , мм	Величина зносу по осьовій силі W_F , мм	Усереднена величина зносу $W_c = 1/2(W_P + W_F)$
1	6,443	2,651	0,221	0,036	0,128
2	9,758	4,314	0,292	0,068	0,180
3	6,036	9,848	0,212	0,201	0,206
4	12,075	10,634	0,336	0,222	0,279
5	12,332	13,500	0,341	0,304	0,323
6	18,246	16,012	0,443	0,381	0,412
7	19,804	19,158	0,468	0,482	0,475
8	27,150	22,259	0,578	0,588	0,583
9	24,407	22,998	0,538	0,614	0,576
10	39,348	25,761	0,741	0,712	0,727
11	37,738	27,604	0,720	0,780	0,750
12	47,086	32,079	0,835	0,951	0,893
13	47,833	36,959	0,844	1,145	0,995
14	61,769	38,421	1,001	1,205	1,103
15	63,282	40,881	1,018	1,308	1,163

За даними таблиці 1 були побудовані залежності приросту потужності різання та приросту осьової сили різання від величини зносу (рис. 5 та 6 відповідно).

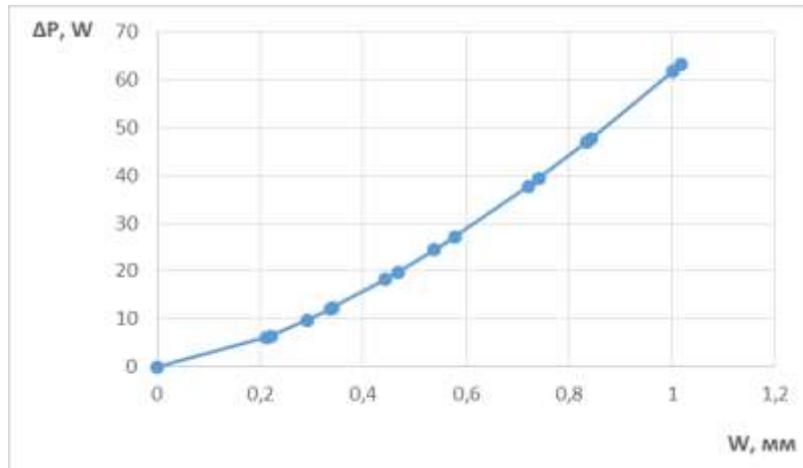


Рисунок 5 – Залежність зміни потужності різання при свердлінні від величини зносу свердла по задній поверхні

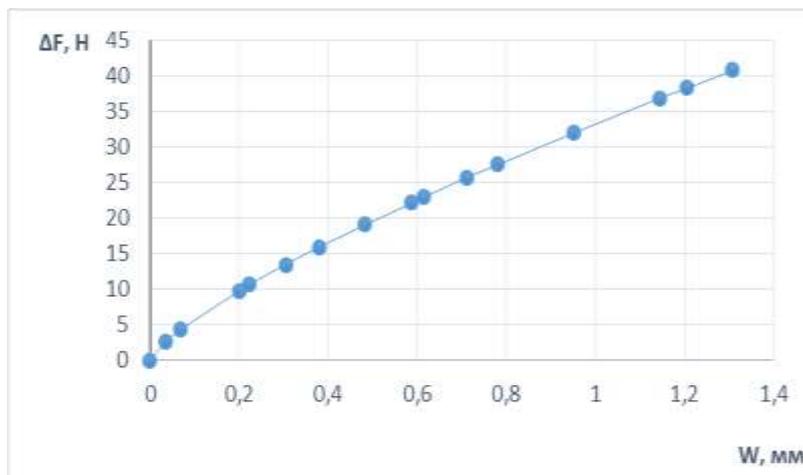


Рисунок 6 – Залежність зміни осьової сили різання при свердлінні від величини зносу свердла по задній поверхні

За результатом обробки даних було отримано залежність зміни значення усередненого зносу від часу роботи свердла. Результат дослідження показав, що стійкість свердла склала 17 хв.

Результати дослідження процесу зносу свердла, який вивчався при обробці заготовки із сталі 30 при свердлінні свердлом діаметром 8 мм, підтвердили близьку до лінійної залежність зносу свердла від часу його роботи. Інші результати дослідження процесу зносу показали придатність запропонованої моделі діагностування зносу свердла для прогнозування періоду стійкості свердла. Слід додати, що за даними таблиці, величина

усередненого зносу більш точно описує стан свердла, що підтверджує вищу точність запропонованої моделі.

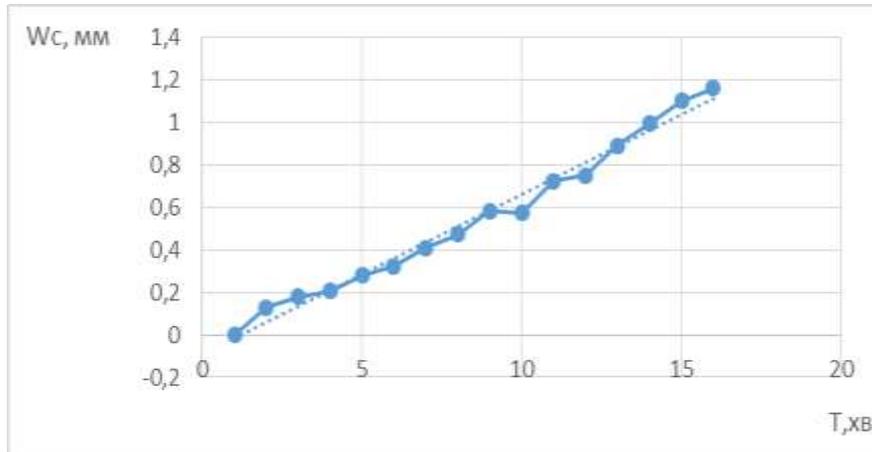


Рисунок 7 – Залежність зміни величини усередненого зносу свердла по задній поверхні від часу його роботи

ВИСНОВКИ

Мотивацією виконання цієї роботи є необхідність моніторингу в процесі обробки зносу інструменту, який під час свердління викликає збільшення сили осьової різання, а отже, і більше споживання енергії. Наша модель комплексного вимірювання потужності і осьової сили різання при свердлінні повністю враховує знос інструменту і, таким чином, є більш точною у прогнозуванні терміну заміни інструменту. Відзначимо такі особливості та основні результати проведеного дослідження:

У роботі використовується експериментальна програма з двома діагностичними параметрами, а саме споживана потужність різання та осьова сила.

В статті протестований пристрій, представлений вище, для ситуацій загального типу обробки свердлінням.

Метод використання діагностичних параметрів (осьова сила + потужність свердління) добре підходить для оцінки зносу свердла. Він простий у реалізації, оскільки можна використовувати лише два датчики (тензодатчик сили та струмовий датчик двигуна шпинделя).

Порогове значення зносу можна налаштовувати для конкретних умов свердління (матеріал заготовки, діаметр свердла тощо).

Особливий вплив на знос свердла мають режими різання, а його довговічність може мати істотно різні значення від одного режиму до іншого. Найкраща довговічність досягається при використанні нижчої швидкості різання і вищої швидкості подачі.

Щодо потенційних майбутніх досліджень з цього питання, з одного боку, ми плануємо розглянути більше діагностичних параметрів для аналізу стану свердла.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] K. Javed, R. Gouriveau, X. Li, N. Zerhouni, Tool wear monitoring and prognostics challenges: a comparison of connectionist methods toward an adaptive ensemble model, *J. of Intelligent Manufacturing* 29 (2018) 1873–1890. doi:10.1007/s10845-016-1221-2.
- [2] K. Salonitis, A. Kolios, Reliability assessment of cutting tool life based on surrogate approximation methods, *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology* 71 (2014) 1197–1208. doi:10.1007/s00170-013-5560-2.
- [3] J. Karandikar, T. McLeay, S. Turner, T. Schmitz, Tool wear monitoring using naive bayes classifiers, *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology* 77 (2015) 1613–1626. doi:10.1007/s00170-014-6560-6.
- [4] A. Gouarir, S. Kurokawa, T. Sajima, M. Murata, In-process tool wear detection of uncoated square end mill based on electrical contact resistance, *Int. J. of Automation Technology* 10 (5) (2016) 767–772. doi: 10.20965/ijat.2016.p0767.
- [5] T. Mohanraj, S. Shankar, R. Rajasekar, N. Sakthivel, A. Pramanik, Tool condition monitoring techniques in milling process a review, *J. of Materials Research and Technology* 9 (1) (2020) 1032–1042. doi:10.1016/j.jmrt.2019.10.031.
- [6] R. Teti, D. Mourtzis, D. D'Addona, A. Caggiano, Process monitoring of machining, *CIRP Ann.* 71 (2) (2022) 529–552. doi:10.1016/j.cirp.2022.05.009.
- [7] R. Corne, C. Nath, M. El Mansori, T. Kurfess, Study of spindle power data with neural network for predicting real-time tool wear/breakage during inconel drilling, *J. of Manufacturing Systems* 43 (2017) 287–295. doi: 10.1016/j.jmsy.2017.01.004.
- [7] Abu-Mahfouz I, Banerjee A (2014) Drill wear feature identification under varying cutting conditions using vibration and cutting force signals and data mining techniques. *Proc Comput Sci* 36:556–563. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.09.054>
- [8] Yaldız, S. and Ünsaçar, F.: Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement, *Mater. Design*, 27, 839–846, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.04.001>
- [9] Ciurezu Gherghe, L. M., Stanimir, A., and Geonea, I.: Experimental research regarding the influence of cutting regime on the wear of drills at steel processing, *Fiability & Durability Supplement No 1/2015*, Publishing House “Academica Brâncușii”, Târgu Jiu, Romania, 118–122, ISSN 1844-640X, available at: https://www.utgjiu.ro/rev_mec/mecanica/pdf/2015-01 .
- [10] Патент US 4207567, МПК G08B 21/00; опубл. 10.06.1980
- [11] Патент US 10,493,583 B2, МПК B23Q 15/16; G08B 24/10, опубл. 3.12.2019.
- [12] Wang Q., Zhang D., Tang K. et al. A mechanics based prediction model for tool wear and power consumption in drilling operations / *Journal of Cleaner Production*, 2019, (234), pp. 171–184, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.148.
- [13] Espressif Systems. ESP32. Available online: <https://surl.li/smlcgc> (accessed on 10 December 2024).
- [14] Zemic L6D. Available online: <https://zemic.com.ua/tenzometrychnyi-datchyk-l6d/> (accessed on 10 December 2024).

AUTOMATIC DIAGNOSTICS OF DRILL CONDITION BY SEVERAL DIAGNOSTIC SIGNS

Palchevskiy, B. DThSc., Prof., Honored Worker of Science and Technology of Ukraine.

Gerasymchuk, D. Master.

Lutsk National Technical University / Ukraine

Abstract. A key problem in mechanical engineering is the prediction of tool wear in real time. Traditional methods rely on conservative tool replacement, which leads to premature tool replacement or excessive tool wear, as well as increased production downtime. Manual assessment of drill condition is time-consuming. To reduce downtime, it is necessary to perform the process of diagnosing the drill condition in production conditions automatically, with high accuracy. Automatic tool condition monitoring systems have shown great potential for detecting and predicting tool wear, reducing the risk of tool breakage and optimizing tool change intervals, but the prediction accuracy is not always sufficient. This study presents an automatic system for predicting tool life in real time, which helps to solve this limitation by integrating several control modules. The prediction system includes machine-mounted modules for direct control of feed force and cutting power consumption signals, a signal integration module by connecting them for real-time data management, and a data processing module for predicting tool wear. In the last module, based on these signals, an integral indicator of drill wear is generated, the degree of approximation of which to the permissible wear value determines the condition of the drill as “fit for work” or “unfit for work”. Obviously, an approach of model aggregation in machine learning is proposed here, when several models are combined to obtain better results than any individual model gives in order to increase the accuracy, stability and generalization ability of the diagnostic system. The paper uses an aggregated forecasting model based on the use of the axial cutting force signal and the power consumed by the spindle signal to control tool wear.

Keywords: twist drill, tool condition monitoring, drill wear, power sensor, axial drilling force sensor.

Дата першого надходження
статті до видання

18.09.2025 р.

Дата прийняття статті до друку
статті після рецензування

30.09.2025 р.

Дата
оприлюднення

23.12.2025 р.