

УДК 620.179

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-27

Чалий В. Д., Мороз С. А., Лишук В. В., Приступа С. О., Євсюк М. М.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

## ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТИПІВ ДАВАЧІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

*У роботі представлено систематизований огляд сучасних типів давачів акустичної емісії (АЕ), що застосовуються у системах технічної діагностики та моніторингу процесів механічної обробки. Проаналізовано принципи дії, конструктивні особливості та метрологічні характеристики п'єзоелектричних, ємнісних, оптичних, MEMS-, тонкоплівкових, а також спеціалізованих обертових, внутрішньошипіндельних, кільцевих, статичних і рідинних АЕ-давачів. Виявлено відсутність уніфікованих методик порівняння сенсорів у реальних умовах експлуатації, що ускладнює їх обґрунтований вибір для конкретних діагностичних задач. Показано, що сучасні дослідження зосереджені на підвищенні чутливості сенсорів, розширенні робочого частотного діапазону та оптимізації методів обробки сигналів. Обґрунтовано актуальність проведення експериментального порівняння різних типів давачів за параметрами чутливості, частотного відгуку, відношення сигнал/шум і стійкості до зовнішніх впливів. Матеріали роботи формують основу для створення рекомендацій з вибору АЕ-давачів залежно від конструктивних умов, режимів обробки та вимог до точності моніторингу, а також визначають напрями подальших досліджень у галузі сенсорики та акустико-емісійного контролю.*

**Ключові слова:** акустична емісія, давачі АЕ, шліфування, контроль процесу.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** У сучасних системах технічної діагностики все ширше застосовуються методи акустичної емісії, оскільки вони дозволяють проводити неруйнівний контроль матеріалів, виявляти дефекти на ранніх етапах та здійснювати моніторинг технічного стану обладнання в режимі реального часу [1, 2]. Ефективність таких систем значною мірою визначається правильним вибором типу давача акустичної емісії, який має забезпечувати необхідний частотний діапазон, чутливість, завадостійкість та стабільність роботи. На практиці використовуються різні конструкції давачів – резонансні, широкосмугові, п'єзоелектричні, ємнісні та оптичні, кожна з яких має власні переваги та обмеження. Зокрема крім п'єзоелектричних сенсорів, застосовуються лазерні інтерферометри та ємнісні давачі, що дають змогу розширити частотний діапазон вимірювання до десятків мегагерц.

Відсутність узагальненого порівняльного аналізу характеристик цих давачів ускладнює обґрунтований вибір сенсорів для конкретних умов експлуатації. Тому актуальною є задача систематизації інформації про типи давачів АЕ та оцінки їх придатності для різних діагностичних задач.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, де розв'язувались завдання цієї проблеми, виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячена стаття.** Останні публікації демонструють стійкий розвиток напрямів, пов'язаних із MEMS- та тонкоплівковими акустико-емісійними сенсорами. У роботах [3, 4] відзначається підвищена увага до мікроелектромеханічних конструкцій (п'єзоелектричних, ємнісних, оптичних), що зумовлено їхньою мініатюрністю, можливістю інтеграції з електронікою, малою масою та перспективами масштабованого виробництва. Дослідження зосереджуються переважно на покращенні чутливості тонкоплівкових елементів та розширенні їхнього робочого температурного діапазону.

Помітна активність спостерігається й у сфері АЕ-моніторингу процесів механічної обробки. Низка робіт [5, 6] уточнює методики використання АЕ-сенсорів для виявлення зношення інструмента, контролю контакту «інструмент – заготовка», ранньої діагностики дефектів і оптимізації режимів різання. Паралельно триває формування підходів до попередньої обробки сигналу – фільтраційних методів, аналізу огинаючої та вейвлет-перетворень, а також визначення оптимальних точок встановлення сенсорів.

Попри значний прогрес, у сучасній літературі фіксуються кілька системних обмежень. По-перше, відсутня уніфікована методика порівняння сенсорів у реальних виробничих умовах:

більшість експериментів виконано на лабораторних стендах, що ускладнює зіставлення характеристик різних типів давачів за єдиними критеріями (SNR, частотний відгук, температурна та вібраційна стабільність). По-друге, мало представлених довготривалих польових досліджень, необхідних для оцінки надійності нових MEMS- і тонкоплівкових рішень у середовищах із забрудненнями, змащувально-охолоджувальними рідинами та ерозійними навантаженнями. По-третє, питання шумів та індустриальних перешкод лишається відкритим: хоча існують окремі алгоритмічні та апаратні пропозиції, у галузі немає узгоджених рекомендацій щодо оптимальних схем попередньої електронної обробки для різних технологічних ситуацій.

**Мета роботи.** Метою статті є проведення систематичного експериментального порівняння різних типів давачів акустичної емісії за уніфікованою методикою з оцінюванням їх чутливості, частотних характеристик, співвідношення сигнал/шум та стійкості до зовнішніх впливів, з подальшим визначенням їх придатності до використання в системах технічної діагностики.

**Постановка завдання.** Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати особливості принципу дії та конструктивні характеристики поширених типів АЕ-давачів (резонансних, ширококутових, п'єзоелектричних, ємнісних тощо), які визначають їхню чутливість та робочий частотний діапазон.

2. Провести порівняльний аналіз функціональних характеристик давачів АЕ, визначивши сильні та слабкі сторони кожного типу АЕ-давачів.

3. Сформулювати практичні рекомендації щодо вибору давачів для систем технічної діагностики залежно від вимог до точності, частотного діапазону, робочого середовища та умов монтажу.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих результатів.**

Давачі акустичної емісії є ключовими елементами систем діагностики та моніторингу технологічних процесів, що супроводжуються виникненням високочастотних коливань. Найбільш поширеним матеріалом для їх виготовлення є п'єзоелектричні кристали, які генерують електричний потенціал у відповідь на деформацію. Найчастіше використовується титанат-цирконат свинцю (PZT), який забезпечує найвищу чутливість серед п'єзоелектричних матеріалів.

Вихідний сигнал давача формується як функція зміщення контактної поверхні та залежить як від часу, так і від просторового положення сенсора у зоні вимірювання. Чутливість давачів АЕ орієнтована переважно на переміщення по нормалі до поверхні встановлення, що диктує вимоги до правильного вибору місця монтажу.

П'єзоелектричний чутливий елемент розміщується у конструктивному корпусі сенсора, де перетворює механічні коливання в електричну напругу. Такий сенсор є пасивним, а його вихід можна описати інтегральним співвідношенням:

$$U(t) = \frac{1}{A} \iint_S u(x, y, t) r(x, y) dx dy, \quad (1)$$

де  $r(x, y)$  – локальна чутливість грані перетворювача;  $S$  – поверхня контакту;  $A$  – ділянка на поверхні  $S$ ;  $u(x, y, t)$  – переміщення на поверхні.

Значення напруги, що генерується такими сенсорами, зазвичай не перевищує декількох мілівольт, тому необхідне підсилення сигналу на 20, 40 або 60 дБ із подальшою фільтрацією та обробкою. Номінал підсилення вибирається залежно від величини амплітуди джерела сигналу.

Під час видалення припуску в процесі механічної обробки у конструктивних елементах верстата виникають механічні коливання, що формують акустичну емісію (АЕ) з високочастотними, переважно ультразвуковими компонентами. Реєстрація цих коливань здійснюється АЕ-давачами, встановленими у технологічно значущих зонах. Отримані сигнали обробляються електронною системою та візуалізуються на локальних або віддалених інтерфейсах, включно з НМІ верстата.

Застосування АЕ-технології забезпечує контроль процесів механічної обробки, зокрема шліфування, дозволяючи оцінювати якість поверхні, зношення інструмента та технічний стан обладнання. Використання статичних та обертових давачів (у тому числі з безконтактною передачею сигналу) забезпечує високе відношення сигнал/шум і фіксацію мінімальних змін у процесі, що підвищує ефективність та знижує експлуатаційні витрати.

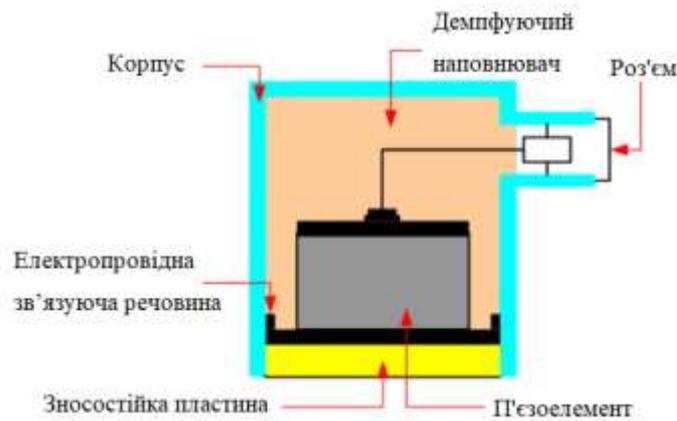


Рисунок 1 – Схема типової конструкції давача АЕ [6]

Вібрації у зоні контакту інструмента із заготовкою супроводжуються короточасними пластичними деформаціями матеріалу, які генерують ультразвукові хвилі. Ці хвилі реєструються п'єзоелектричними давачами за зміною електричного потенціалу, індукованого деформаціями чутливого елемента.

У шліфувальних верстатах АЕ дозволяє аналізувати шум, який виникає під час взаємодії шліфувального круга з деталлю або правлячим інструментом, що забезпечує контроль як процесу шліфування, так і правки. Ультразвукові хвилі, поширюючись конструкцією верстата, зазнають змін амплітуди й частоти, що дає можливість оцінювати стан процесу та здійснювати автоматичні коригувальні дії.

Ефективність системи АЕ-контролю визначається оптимальним розташуванням давачів – максимально близько до зони різання. Зміни параметрів АЕ сигналізують про варіації сили різання, ступінь зношення круга або наближення до граничного стану інструмента, що дозволяє адаптувати режими обробки. АЕ також застосовується для скорочення циклу шліфування завдяки точному визначенню моменту контакту круга з деталлю та використанню огинаючої сигналу для спрощення аналізу. Крім того, система може виконувати функції контролю зіткнень, забезпечуючи миттєве зупинення верстата для запобігання пошкодженням. Окремий різновид – обертовий давач (М-давач) АЕ (рисунок 2). Його роторна частина встановлюється на шпинделі або фланці шліфувального круга чи правлячого диска, тоді як статор закріплюється на кожусі або спеціальному тримачі. Така конструкція дозволяє здійснювати вимірювання безпосередньо в обертових вузлах верстата та забезпечує високий рівень чутливості та інформативності сигналу.

Давач акустичної емісії може встановлюватися у таких конструктивних зонах: на шпинделі шліфувального круга; на опорному фланці шліфувального круга.

Функціональні можливості давача включають: моніторинг процесу правки шліфувального круга; моніторинг процесу шліфування.

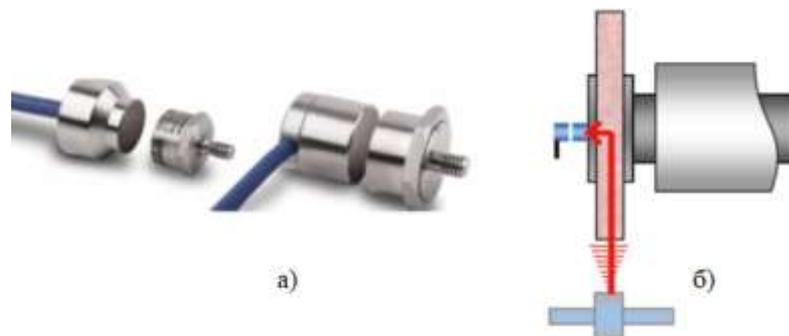


Рисунок 2 – М-давач: а) загальний вигляд; б) схема розташування на верстаті

Користувачські переваги такого типу давачів полягають у наступному: спрощена процедура монтажу; високе відношення сигнал/шум, оскільки давач розташовується максимально близько до джерела АЕ – у зоні контакту інструмент–деталь; уникнення втрат сигналу, які виникають при передачі через механічні вузли (підшипники, корпус шпинделя);

низька чутливість до вібрацій шпинделя — сучасні М-давачі мають фільтрацію паразитних коливань; підтримка високих частот АЕ (до 1 МГц і вище), що робить їх придатними для діагностики мікротріщин та початку контакту при правці.

Технічні особливості: робочий частотний діапазон: 150–800 кГц, інколи до 1,2 МГц; динамічний діапазон – високий, дозволяє виявляти як слабкі, так і інтенсивні АЕ-імпульси; температурна стійкість: до 80–120 °С в зоні шпинделя; здебільшого потребує калібрування для конкретної конструкції верстата.

Ще один різновид це мікродавач / внутрішній давач шпинделя. Конструктивно поворотна частина давача, як показано на рисунку 3, складається з п'єзоелектричного чутливого елемента та електронного модуля передачі сигналу. Геометричні параметри давача можуть бути адаптовані відповідно до специфічних вимог конкретного застосування. Давач інтегрується всередину шпинделя шліфувального круга або шпинделя правлячого інструмента, що забезпечує високий рівень чутливості та інформативності вимірювань завдяки безпосередньому розташуванню у зоні генерації акустичних коливань.

Місця встановлення давача можуть включати: інтеграцію у шпиндель заготовки; монтаж у шпиндель правлячого інструменту; розміщення у шпинделі шліфувального круга.

Функціональні можливості давача передбачають: контроль параметрів процесу правки; моніторинг процесу шліфування.

Користувацькі переваги: розташування давача у безпосередній близькості до зони різання та значна площа чутливого елемента забезпечують високий рівень інформативності та якість реєстрованого сигналу; стабільність роботи на високих обертах та в умовах підвищених вібрацій; мінімальна залежність від конструктивних особливостей корпусу верстата, на відміну від зовнішніх або статичних давачів.

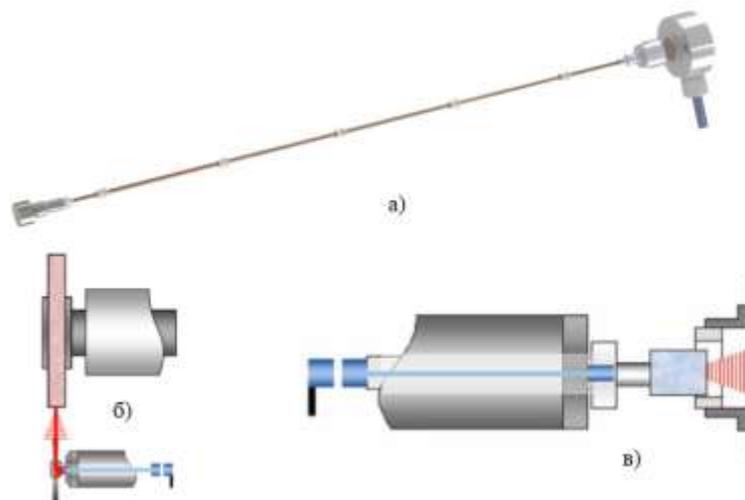


Рисунок 3 – Мікродавач/внутрішній давач шпинделя: а) вигляд загальний, б) схема місця давача у шпинделі інструмента, в) схема розташування давача у шпинделі шліфкруга

Наступний різновид це кільцевий давач. Конструктивно нерухома та обертова частини давача, як зображено на рисунку 4, виконані у формі кільця та доступні в широкому діапазоні типорозмірів і конфігурацій. Це дає змогу здійснювати зовнішнє встановлення на різні типи шліфувальних шпинделів. Монтаж давача може здійснюватися на фланці шліфувального круга, безпосередньо на шпинделі або на торцевій опорі заготовки, що забезпечує ефективне вилучення сигналів акустичної емісії у критичних конструктивних зонах.

Можливі варіанти встановлення давача включають: монтаж у шпинделі заготовки; інтеграцію у шпиндель правлячого інструменту; розміщення у шпинделі шліфувального круга; установлення на опорному фланці шліфувального круга.

Функціональні можливості давача передбачають: контроль параметрів процесу правки; моніторинг процесу шліфування; основний робочий діапазон – 50 кГц ... 800 кГц; резонансна частота (у залежності від моделі) – 150...400 кГц; типові значення чутливості – 50 ... 80 дБ (реф. 1 В/м/с); співвідношення сигнал/шум (SNR) – 40...60 дБ; відхилення чутливості по окружності: не більше  $\pm 3$  дБ.

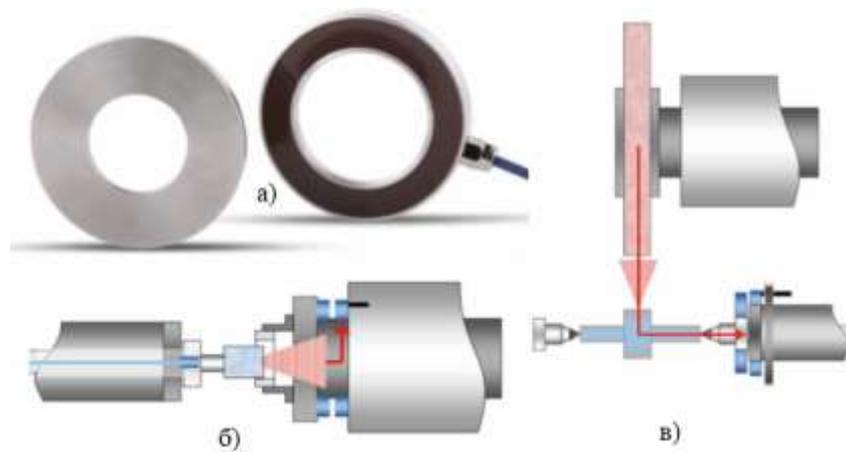


Рисунок 4 – Кільцеві-давачі: а) – загальний вигляд давача; б) – схема розташування давача на внутрішньошліфувальному верстаті; в) – схема розташування давача на зовнішньошліфувальному верстаті

Основні переваги для кінцевого користувача: безпосередній контакт із правлячим або шліфувальним інструментом забезпечує максимальну якість та інформативність сигналу; давач має стаціонарне виконання, що підвищує стабільність вимірювань.

Статичні давачі (S-давачі) ще один різновид АЕ давачів, конструкція яких наведена на рисунку 5, характеризуються компактністю та можливістю передавання сигналу через посадочну поверхню. Такі давачі встановлюються на опорі бабки, на поверхні деталі, шліфувального круга або правлячого інструмента, забезпечуючи ефективне знімання сигналів акустичної емісії без необхідності рухомих елементів.



Рисунок 5 – Загальний вигляд кільцевих-давачів: а) мікро-S-давача; б) міні-S-давача; в) міні-магнітного давача; г) S-давача; д) SF-давача; е) схема розташування давача на верстаті

Давач може бути встановлений у таких позиціях: на бабці шпинделя заготовки; на бабці шпинделя шліфувального круга; на бабці шпинделя правлячого інструменту.

Функціональні можливості давача включають: контроль параметрів процесу правки; моніторинг процесу шліфування; робочий частотний діапазон – 50 кГц ... 1000 кГц; типові резонансні частоти – 150–300 кГц; смуга пропускання: широкосмуговий або вузькосмуговий варіант; чутливість – 45 ... 75 дБ (відносно 1 В/м/с); співвідношення сигнал/шум (SNR) – 35–55 дБ; нерівномірність чутливості: не більше  $\pm 2$  ...  $\pm 3$  дБ.

Основні експлуатаційні переваги: спрощена процедура монтажу; отримання сигналів високої якості завдяки сприятливим умовам встановлення.

Наступний різновид це рідинний акустичний давач є ультразвуковим сенсором акустичної емісії з передаванням сигналу по кабельній лінії та поверхневим поширенням хвиль (рисунок 6). Знімання інформації здійснюється через шар змащувально-охолоджувальної рідини, що циркулює у верстаті, завдяки чому забезпечується стабільний контакт та ефективна акустична передача.

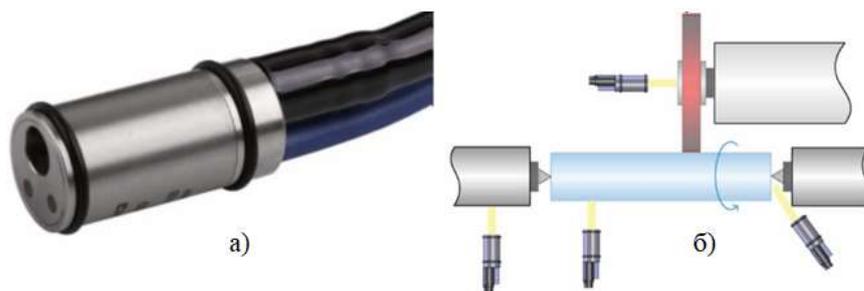


Рисунок 6 – Рідинний акустичний давач:

а) – загальний вигляд давача, б) – схема розташування давача на верстаті

Додаткові функціональні можливості давача: контроль процесу правки як на нерухомих, так і на обертових поверхнях; моніторинг процесу шліфування для статичних і динамічних зон контакту; робочий діапазон частот – 20 кГц ... 600 кГц; пікова чутливість – 100...300 кГц; смуга пропускання ( $\pm 6$  дБ) – 50...400 кГц; чутливість у рідині – 60...95 дБ; SNR – 45...70 дБ (високий за рахунок рідинного узгодження); мінімальна амплітуда сигналу – 1...5 мВ.

Можливі канали отримання сигналу: від заготовки; від інструмента (ріжучого, правлячого або технологічної оснастки); від бабки шпинделя (заготовки, ріжучого чи правлячого інструменту); від пристрою базування та закріплення заготовки.

Переваги для користувача: проста установка і можливість швидкої інтеграції в існуюче обладнання; висока стійкість до електромагнітних завад, що генеруються верстатом; сумісність із більшістю систем обробки сигналів АЕ без потреби у додатковому попередньому підсиленні.

Акустична емісія передається через потік змащувально-охолоджувальної рідини до рідинного АЕ-давача. Завдяки електричній та акустичній ізоляції давача від конструкції верстата рівень фонового шуму значною мірою знижується, що забезпечує підвищену чистоту та стабільність отримуваних сигналів.

Аналіз функціональних характеристик давачів АЕ наведений у таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика давачів АЕ

Тип Критерій давача	Обертовий (М-давач)	Мікродавач (внутр. шпинделя)	Кільцевий давач	Статичний (S-давач)	Рідинний АЕ-давач
Спосіб контакту	безпосередній / через фланець; безконтактна передача сигналу	безпосередній внутрішній контакт; безконтактна передача	контакт через кільцеву поверхню	контакт через посадочну поверхню (паста/гвинт)	акустичне узгодження через рідину
Частотний діапазон (типовий)	150 кГц – 1 МГц	150 кГц – 1 МГц	50 кГц – 800 кГц	50 кГц – 1000 кГц	20 кГц – 600 кГц
Чутливість / SNR	дуже висока (від близькості до джерела)	найвища (мінімальна затухання)	висока (велика площа контакту)	середня/висока (залежить від монтажу)	дуже висока у рідині (найкраще узгодження)
Темп. робочий діапазон	0...+80°C (спецмоделі до +120 °C)	0...+80 (120)°C (залежить від внутр. електроніки)	0...+80 °C	-10...+70 °C	-10...+90(120)°C (залежить від рідини)

**Висновки.** Узагальнення функціональних можливостей та експлуатаційних переваг різних типів АЕ-давачів дозволяє сформулювати комплексні рекомендації щодо їх застосування залежно від задачі контролю: виявлення контакту в шліфуванні, моніторинг правки, діагностика зношення інструмента чи контроль мікротріщин.

Якщо пріоритет – максимальна інформативність і SNR, найкращий вибір – мікродавач / внутрішній давач шпинделя або обертовий М-давач. Ці рішення дають мінімальні втрати сигналу, але вимагають пристосування конструкції шпинделя й мають вищу вартість. Якщо потрібна універсальна, недорога і швидкоінтегрована опція, доцільно використовувати стаціонарні S-давачі. Вони прості в монтажі, хороші для модернізації існуючих верстатів, але можуть поступатися у SNR при слабких джерелах АЕ. Кільцевий давач оптимальний для завдань, де важлива рівномірність прийому по периметру шпинделя – наприклад, для контролю правки, коли джерело АЕ може переміщуватися по окружності. Рідинний АЕ-давач рекомендується у середовищах із ЗОР або сильним забрудненням поверхні, або коли потрібно контролювати АЕ через шар рідини (передача через ЗОР, трубопроводи, герметичні стінки). Він забезпечує дуже ефективне акустичне узгодження, але потребує організації герметичного контакту та контролю властивостей рідини. Виконана систематизація характеристик підтверджує доцільність використання різних сенсорних рішень у комбінації з оптимально налаштованою системою передпідсилення та фільтрації.

### Інформаційні джерела

1. Мороз С. А., Петрук І. В., Петрук О. В. Акустична емісія як відображення мікродинамічних процесів під час шліфування // "Перспективні технології та прилади". Збірник наукових праць. Випуск 10(1). м. Луцьк, червень 2017 р. Луцьк: Луцький НТУ, 2017. С. 149–153.
2. Чалий В.Д., Кузьмич А.І. Моніторинг процесу шліфування за допомогою акустичної емісії. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: матеріали VI-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції (23-25 жовтня 2024 р.). Збірник тез. Луцьк. ЛНТУ, 2024. С. 113-114.
3. MEMS Acoustic Sensors: Charting the Path from Research to Real-World Applications [https://www.mdpi.com/2072-666X/16/1/43?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.mdpi.com/2072-666X/16/1/43?utm_source=chatgpt.com)
4. Tool Wear Monitoring in Milling Processes Based on Time-Frequency Analysis of Acoustic Emission [https://www.scientific.net/AMM.141.574?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.scientific.net/AMM.141.574?utm_source=chatgpt.com)
5. Diamond Grinding Wheel Condition Monitoring Based on Acoustic Emission Signals [https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1054?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1054?utm_source=chatgpt.com)
6. Tool Condition Monitoring Methods Applicable in the Metalworking Process [https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-023-09979-w?utm\\_source=chatgpt.com](https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-023-09979-w?utm_source=chatgpt.com)

**Chaly V., Moroz S., Lyshuk V., Prystupa S., Yevsyuk M.**  
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

### COMPARATIVE STUDY OF TYPES OF ACOUSTIC EMISSION SENSORS FOR TECHNICAL DIAGNOSTICS SYSTEMS

*The paper presents a systematic review of modern types of acoustic emission (AE) sensors used in systems for technical diagnostics and monitoring of machining processes. The principles of operation, design features and metrological characteristics of piezoelectric, capacitive, optical, MEMS, thin-film, as well as specialized rotating, intraspindle, ring, static and liquid AE sensors are analyzed. The lack of unified methods for comparing sensors in real operating conditions is revealed, which complicates their informed choice for specific diagnostic tasks. It is shown that modern research is focused on increasing the sensitivity of sensors, expanding the operating frequency range and optimizing signal processing methods. The relevance of conducting an experimental comparison of different types of sensors in terms of sensitivity, frequency response, signal/noise ratio and resistance to external influences is substantiated. The materials of the work form the basis for creating recommendations for the selection of AE sensors depending on the design conditions, processing modes and requirements for monitoring accuracy, and also determine the directions of further research in the field of sensors and acoustic emission control.*

**Keywords:** acoustic emission, AE sensors, grinding, process control.

Дата першого надходження  
статті до видання  
19.11.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
16.12.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р