

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.4(93).16248

В. А. ВОЙТОВ, К. А. ФЕНЕНКО, А. Г. КРАВЦОВ

*Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАТИВНИХ АМПЛІТУД АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ТРИБОСИСТЕМ ПРИ ЗМІНІ КОНСТРУКТИВНИХ, ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ**

У представленій роботі отримано експериментальні залежності, які підтвердили адекватність розроблених математичних моделей формування акустичного випромінювання (АЕ) із зони тертя трибосистем з урахуванням конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. Встановлено кореляційний зв'язок між значеннями пік-факторів різних кластерів та швидкістю зношування і коефіцієнтом тертя, що підтверджує адекватність математичних моделей розподілу сигналу АЕ на кластери. Встановлено, що кластерний амплітудний аналіз сигналів акустичної емісії з зони тертя трибосистеми на інформативних частотах дозволяє ідентифікувати поверхневі процеси під час тертя та зношування, тим самим підвищити робастність методу АЕ. При цьому, значення коефіцієнта кореляції параметрів тертя та зношування до обраних параметрів акустичної емісії знаходяться в межах 0,8-0,96. Показано, що даний аналіз може бути основою для розробки методики діагностування трибосистем під час експлуатації. Це дозволить вимірювати швидкість зношування і втрати на тертя, у вигляді коефіцієнта тертя, в будь-який момент часу експлуатації і розраховувати ресурс трибосистеми. Отримано регресійні рівняння, які дозволяють розраховувати значення коефіцієнта тертя і швидкості зношування трибосистем за результатами моніторингу акустичного випромінювання під час експлуатації в онлайн-режимі.

Ключові слова: трибосистема; акустична емісія; інформативна частота; інформативна амплітуда; методика діагностування; швидкість зношування; коефіцієнт тертя; робастність методу; коефіцієнт кореляції.

Вступ. Акустичні коливання, які генерує трибосистема в процесі роботи, виникають унаслідок ударної взаємодії шорсткостей поверхонь тертя їх пружньопластичної деформації, процесами утворення і руйнування фрикційних зв'язків (режим stick-sleep [1]), структурно-фазовою перебудовою матеріалів, утворенням і розвитком мікротріщин в поверхневих шарах контактуючих тіл, відділенням частинок зносу. Фрикційна взаємодія двох тіл відбувається не по всій площі контактуючих поверхонь, а в межах «фактичних плям контакту». Через дискретність фрикційного контакту твердих тіл, а також випадкового характеру розподілу температурних і деформаційних полів на даних плямах, акустичне випромінювання із зони тертя має статистичну природу.

Методичний підхід в застосуванні акустичної емісії (АЕ), як методу діагностування трибосистем, можна розділити на дві складові. Це частотний аналіз акустичного випромінювання із зони тертя і амплітудний аналіз. Аналіз публікацій з даної проблеми показує, що більшість досліджень базується на амплітудному аналізі. При сучасному розвитку засобів реєстрації сигналів, застосування такого методу дозволяє отримувати інформацію про стан поверхонь тертя в онлайн-режимі.

Реєстрація амплітуд акустичних сигналів із зони тертя в інформативній смузі частот дозволяє з високою точністю визначити час подій, що

відбуваються. Такі події включають в себе пружню взаємодію мікроступів сполучених поверхонь, утворення і руйнування адгезійних зв'язків, появу мікротріщин і відділення частинок зносу.

Аналіз останніх публікацій по даній проблемі. Авторами роботи [2], виконано аналіз публікацій, щодо застосування АЕ для діагностування різних трибосистем. Автори роблять висновок, що дослідження по акустико-емісійному діагностуванню механізмів ґрунтуються на використанні ознак дискретної емісії: рахунок - кількість імпульсів зареєстрованих за весь час випробувань; активність - кількість імпульсів за одиницю часу [3]. Що стосується безперервної емісії, коли окремі імпульси розрізнити неможливо, то її характеризують параметрами, які широко використовуються у вібраційній діагностиці: середньоквадратичним відхиленням; пік-фактором; спектром коливань [4]. Крім того, використовують тимчасові параметри: тривалість фронту і спаду імпульсів [4], параметри розподілу імпульсів по амплітуді і вейвлет-перетворення [5].

На підставі аналізу робіт західних вчених [6-11], в роботі [12] робиться висновок, що перспективним напрямком є обґрунтування акустико-емісійних ознак дефектів, інваріантних до масштабування сигналу по амплітуді. Обумовлено це тим, що флуктуації сигналу, відмінності амплітудно-частотних характеристик датчиків, впливають на результат вимірювання енергетичних параметрів емісії, таких як енергія, середнє значення амплітуд, спектр і результат вейвлет-перетворення. Перераховані фактори впливають на параметри сигналу акустичної емісії, що реєструється. На думку авторів роботи [12] при вимірюванні часових параметрів акустичної емісії доцільно вибирати пороговий рівень амплітуд, що визначається з умови мінімуму ймовірності похибки діагностування.

Гарна кореляція між акустичною емісією і внутрішнім тертям структури матеріалів була встановлена експериментально під час швидкого зміцнення модельних полікристалів міді і монокристалів, що деформуються циклічно при постійних амплітудах пластичної деформації [13]. Авторами встановлено кореляційний зв'язок між амплітудами сигналів АЕ та значеннями внутрішнього тертя структури металів. Такий зв'язок розширює підходи до моделювання режимів циклічної деформації і дозволяє розрахувати основні характеристики процесу дисипації пружної енергії при пластичній деформації.

Робота [14] присвячена встановленню механізму акустичної емісії при терті ковзання. Авторами встановлено взаємозв'язок між середньоквадратичним значенням амплітуд сигналів АЕ та значеннями шорсткості поверхонь тертя. На думку авторів контакт вершини шорсткості є головним джерелом АЕ. Показано, що середньоквадратичне значення амплітуд сигналів АЕ сильно залежить від параметрів шорсткості поверхні тертя.

Для визначення максимальних значень швидкості зношування під час перехідного процесу авторами роботи [15] обґрунтовано інформативний параметр - потужність сигналів АЕ. Авторами показано, що потужність сигналів АЕ, яка пропорційна квадрату амплітуд, що зареєстровані, корелює зі швидкістю зношування, коефіцієнт кореляції $r = 0,98$ і адекватно відображає процес припрацювання.

На підставі виконаного аналізу робіт, присвячених вибору інформативних параметрів АЕ для діагностики трибосистем, можна зробити висновок, що для

визначення швидкості зношування і коефіцієнта тертя в процесі роботи трибосистем (в онлайн-режимі), найбільш перспективним підходом може виступати розподіл сигналу АЕ на складові - кластери. Аналіз величин амплітуд кожного кластера, в смузі інформативних частот, дозволить отримати інформацію про окрему групу процесів, що відбуваються в поверхневих шарах матеріалів трибосистеми, що дозволить підвищити робастність даного методу і інформативність діагностування трибосистем.

Мета дослідження. Метою експериментальних лабораторних випробувань є підтвердження адекватності розроблених математичних моделей розподілу акустичного випромінювання із зони тертя на кластери за величинами амплітуд з урахуванням конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів трибосистем.

Методичний підхід в проведенні досліджень. При визначенні кореляційного зв'язку між значеннями пік-факторів різних кластерів та об'ємною швидкістю зношування, коефіцієнтом тертя і процесами припрацювання трибосистем, скористаємося роботою [16]. Загальний сигнал АЕ підлягає розподілу на кластери. Кластер – це підмножина однотипних імпульсів з однаковою величиною амплітуд A_i , пов'язаних єдиними джерелами генерації.

Перший кластер $K1$ – це базовий пакет сигналів АЕ, або базовий фрейм. Джерелами генерації базового пакета сигналів є: ковзання дислокацій при деформації поверхневих шарів на плямах фактичного контакту; міжзеренне ковзання; ротація блоків (зерен); двійникування; структурна перебудова (фазові перетворення через високі температури на плямах фактичного контакту).

На підставі роботи [16] запишемо формулу для розрахунку пік-фактора базового кластера $K1$:

$$P_{AE}^{K1} = \frac{\left\langle \sum_{n=1}^n \sum_{m=1}^m (A_1 \cdot A_{max1}) \right\rangle}{\sum_{n=1}^n |A_i|^2}, \quad (1)$$

де n – загальна кількість імпульсів сигналу АЕ, які належать фрейму базового кластера $K1$; m – кількість імпульсів сигналу АЕ, які перевищують середнє значення амплітуд базового кластера $K1$ в 1,2 – 1,4 рази; A_1 – значення амплітуд усіх імпульсів АЕ, які належать фрейму базового кластера $K1$; $A_{max,1}$ – значення амплітуд імпульсів АЕ, які належать фрейму базового кластера $K1$, та перевищують середнє значення амплітуд в кластері в 1,2 – 1,4 рази. Обґрунтування величин амплітуд наведено в роботі [17].

Другий кластер $K2$ – це пакет сигналів АЕ, який характеризується викидами амплітуд, значення яких перевищує середнє значення амплітуд першого (базового) кластера $K1$ в 1,6 – 2,3 рази. Джерелами генерації сигналу кластера $K2$ є: стрибки деформації на плямах фактичного контакту в результаті яких утворюються смуги ковзання; стрибкоподібний рух виступів шорсткостей за рахунок зміни сил адгезії, режим stick-slip.

На підставі роботи [16] запишемо формулу для розрахунку пік-фактора кластера $K2$:

$$P_{AE}^{K2} = \frac{\left\langle \sum_{n=1}^n \sum_{m=1}^m (A_1 \cdot A_{max2}) \right\rangle}{\sum_{n=1}^n |A_i|^2}, \quad (2)$$

де m – кількість імпульсів сигналу АЕ, які перевищують середнє значення амплітуд базового кластера $K1$ в 1,6 – 2,3 рази; $A_{max,2}$ – значення амплітуд імпульсів АЕ, які належать фрейму кластера $K2$, та перевищують середнє значення амплітуд в кластері $K1$ в 1,6 – 2,3 рази. Обґрунтування величин амплітуд наведено в роботі [17].

Третій кластер – це пакет сигналів АЕ, який характеризується викидами амплітуд, значення яких перевищує середнє значення амплітуд першого (базового) кластера $K1$ в 2,52 – 3,21 рази.

Джерелами генерації сигналу кластера $K3$ є: розвиток втомних тріщин розташованих паралельно і перпендикулярно поверхні тертя; відділення частинок зносу з поверхні тертя у вигляді лусочок або пелюсток за механізмом утомного зношування; відділення частинок зносу з поверхні тертя за механізмом «скочування» окиснювальних плівок або вторинних структур.

На підставі роботи [16] запишемо формулу для розрахунку пік-фактора кластера $K3$:

$$P_{AE}^{K3} = \frac{\left\langle \sum_{n=1}^n \sum_{m=1}^m (A_1 \cdot A_{max,3}) \right\rangle}{\sum_{n=1}^n |A_1|^2}, \quad (3)$$

де m – кількість імпульсів сигналу АЕ, які перевищують середнє значення амплітуд базового кластера $K1$ в 2,52 – 3,21 рази; $A_{max,3}$ – значення амплітуд імпульсів АЕ, які належать фрейму кластера $K3$ та перевищують середнє значення амплітуд в кластері $K1$ в 2,52 – 3,21 рази. Обґрунтування величин амплітуд наведено в роботі [17].

Четвертий кластер – це пакет сигналів АЕ, який характеризується викидами великих амплітуд, значення яких перевищує середнє значення амплітуд першого (базового) кластера $K1$ в 3,91 – 4,6 рази.

Джерелами генерації сигналу кластера $K4$ є: мікрорізання і пластична деформація виступів шорсткостей поверхні тертя, яке характерне для перших етапів припрацювання.

На підставі роботи [16] запишемо формулу для розрахунку пік-фактора кластера $K4$:

$$P_{AE}^{K4} = \frac{\left\langle \sum_{n=1}^n \sum_{m=1}^m (A_1 \cdot A_{max,4}) \right\rangle}{\sum_{n=1}^n |A_1|^2}, \quad (4)$$

де m – кількість імпульсів сигналу АЕ, які перевищують середнє значення амплітуд базового кластера $K1$ в 3,91 – 4,6 рази; $A_{max,4}$ – значення амплітуд імпульсів АЕ, які належать фрейму кластера $K4$ та перевищують середнє значення амплітуд в кластері $K1$ в 3,91 – 4,6 рази. Обґрунтування величин амплітуд наведено в роботі [17].

Експериментальна установка з кінематичною схемою контакту «кільце-кільце», експериментальне устаткування для реєстрації та обробки сигналів АЕ наведено в роботі [18].

При перевірці однорідності дисперсій обраних фреймів сигналів АЕ на сталому режимі роботи трибосистеми, а також відтворюваності результатів від фрейму до фрейму, стандарт ISO 5725 рекомендує використовувати критерій Кохрена. Критерій Кохрена дозволяє порівнювати однорідність дисперсій результатів аналізу сигналів АЕ з різних фреймів.

Результати досліджень. Експериментальні дослідження проводилися для трибосистем, які аналогічні обраним конструкціям для моделювання, що представлено в роботі [16]. В процесі експериментів реєстрували величини амплітуд в інформативній смузі частот 110-650 кГц.

Результати експериментальних досліджень щодо відповідності теоретичних і експериментальних інформативних амплітуд із зони тертя представлені на рис. 1-10. Суцільні криві відображають результати зміни об'ємної швидкості зношування і коефіцієнта тертя від різних факторів. Точки на полі графіка відображають середні значення пік-факторів (інформативних амплітуд) на сталому режимі роботи трибосистеми (після завершення припрацювання) на різних навантаженнях.

На рис. 1 і рис. 2 представлені експериментальні значення зміни об'ємної швидкості зношування і коефіцієнта тертя, а також значення пік-факторів різних кластерів при зміні площі тертя F_{mp} нерухомого трибоелемента при різних навантаженнях. Трибосистема «сталь 40X+БрАЖ 9-4», змащувальне середовище – моторна олива М-10Г_{2к}. Шорсткість поверхонь тертя $Ra = 0,2$ мкм; $Sm = 0,4$ мм. Випробування проводили на трьох конструкціях трибосистем «кільце-кільце», де площа нерухомого, бронзового трибоелемента, складала: $F_{mp} = 0,00006$ м²; $F_{mp} = 0,00015$ м²; $F_{mp} = 0,00024$ м². Площа тертя рухомого трибоелемента, сталь 40X, у всіх трьох конструкціях складала $F_{max} = 0,0003$ м². Швидкість ковзання $v_{ков} = 0,5$ м/с.

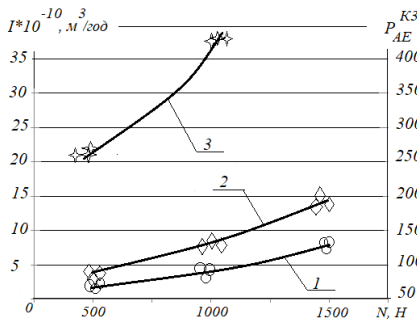


Рис. 1. Залежності зміни об'ємної швидкості зношування та значення пік-фактора кластера $K3$ від навантаження та величини площі тертя нерухомого трибоелемента: 1 – $F_{mp} = 0,00024$ м²; 2 – $F_{mp} = 0,00015$ м²; 3 – $F_{mp} = 0,00006$ м²

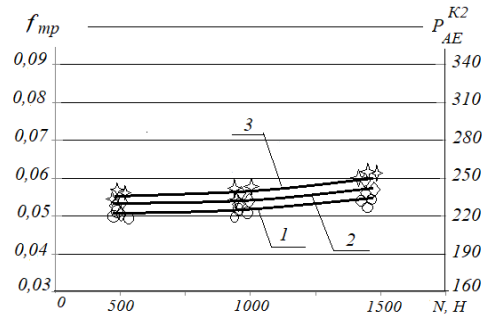


Рис. 2. Залежності зміни коефіцієнта тертя та значення пік-фактора кластера $K2$ від навантаження та величини площі тертя нерухомого трибоелемента: 1 – $F_{mp} = 0,00024$ м²; 2 – $F_{mp} = 0,00015$ м²; 3 – $F_{mp} = 0,00006$ м²

Результати отриманого масиву експериментальних значень були перевірені на відповідність нормальному закону розподілу та після підтвердження відповідності, розраховано значення критерію Кохрена та коефіцієнта кореляції.

Швидкість зношування у сталому режимі тертя реєстрували за допомогою методу штучних баз, коефіцієнт тертя розраховували за значеннями моменту тертя, який реєструвався самописцем машини тертя 2070 СМТ-1.

Розрахунок коефіцієнта кореляції між залежностями зміни значень об'ємної швидкості зношування і значеннями пік-факторів всіх трьох кластерів дозволяє стверджувати про наявність стійкої кореляції між об'ємною швидкістю зношування і значеннями пік-фактора кластера $K3$, формула (3). Коефіцієнт кореляції становить $r_{K3} = 0,87-0,91$. Значення коефіцієнта кореляції між пік-факторами кластерів $K2$ і $K4$

значно нижче, при цьому кореляція між пік-фактором кластера $K4$ нижче 0,5, що доводить про відсутність кореляційного зв'язку.

Розрахунок коефіцієнта кореляції між залежностями зміни значень коефіцієнта тертя і значеннями пік-факторів всіх трьох кластерів дозволяє стверджувати про наявність стійкої кореляції між значеннями пік-фактора кластера $K2$, формула (2). Коефіцієнт кореляції становить $r_{R2} = 0,89-0,94$.

Аналогічні експериментальні залежності були отримані для інших конструктивних факторів. При зміні сполучених матеріалів в трибосистемі залежності зміни об'ємної швидкості зношування і пік-фактора кластера $K3$ представлені на рис. 3, а зміна коефіцієнта тертя і пік-фактора кластера $K2$, на рис. 4. Значення коефіцієнта кореляції між об'ємною швидкістю зношування і пік-фактором кластера $K3$ становить $r_{R3} = 0,85-0,90$, між коефіцієнтом тертя і пік-фактором кластера $K2$, $r_{R2} = 0,90-0,96$.

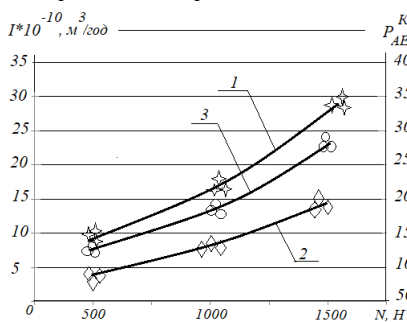


Рис. 3. Залежності зміни об'ємної швидкості зношування та значення пік-фактора кластера $K3$ від навантаження та сполучених матеріалів в трибосистемі: 1 – сталь 40X+сталь 40X; 2 – сталь 40X+БрАж 9-4; 3 – сталь 40X+СЧМ

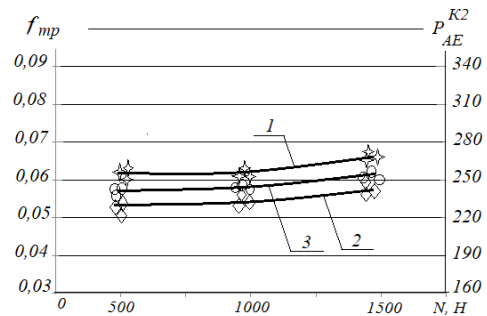


Рис. 4. Залежності зміни коефіцієнта тертя та значення пік-фактора кластера $K2$ від навантаження та сполучених матеріалів в трибосистемі: 1 – сталь 40X+сталь 40X; 2 – сталь 40X+БрАж 9-4; 3 – сталь 40X+СЧМ

Отримані експериментальні дані були перевірені на відповідність нормальному закону розподілу. Відтворюваність результатів вимірювань перевірена згідно з критерієм Кохрена.

На рис. 5 і рис. 6 представлені залежності зміни об'ємної швидкості зношування і коефіцієнта тертя при зміні трибологічних властивостей мастильного середовища. Розрахунок і порівняння значень коефіцієнтів кореляції для даних умов експерименту дозволяють стверджувати про наявність стійкого кореляційного зв'язку між об'ємною швидкістю зношування і пік-фактором кластера $K3$, а також коефіцієнтом тертя і пік-фактором кластера $K2$. Значення коефіцієнтів кореляції знаходяться в межах 0,82-0,94.

Необхідно відзначити, що при визначенні інформативних частот, робота [18], зроблено висновок про незначний вплив трибологічних властивостей мастильного середовища на величини інформативних частот. Коефіцієнт варіації постійний і знаходиться на рівні $v_f = 15,1\%$. Однак даний конструктивний фактор значно впливає на величини амплітуд, що генеруються. Пік-фактор кластера $K3$ змінюється у великих межах: 60-480, а пік-фактор кластера $K2$ в межах: 170-300. Це говорить про хорошу чутливість обраних параметрів – пік-факторів відповідних кластерів до зміни об'ємної швидкості зношування і коефіцієнта тертя при зміні конструктивних факторів трибосистем, що дозволить в подальшому отримати робастну методику діагностування трибосистем в експлуатації.

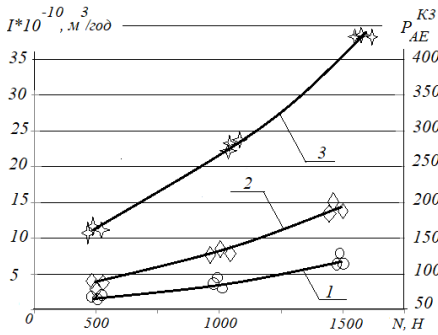


Рис. 5. Залежності зміни об'ємної швидкості зношування та значення пік-фактора кластера $K3$ від навантаження та трибологічних властивостей змащувального середовища: 1 – трансмісійна олива ТАД-17_и; 2 – моторна олива М – 10Г_{2к}; 3 – гідравлічна олива МГП – 10

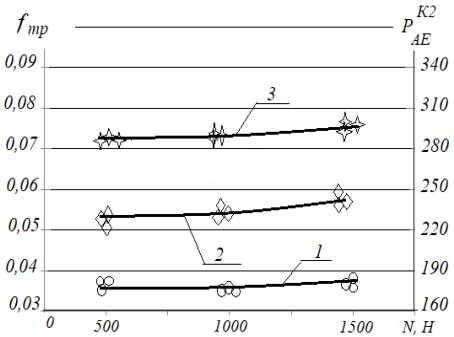


Рис. 6. Залежності зміни коефіцієнта тертя та значення пік-фактора кластера $K2$ від навантаження та трибологічних властивостей змащувального середовища: 1 – трансмісійна олива ТАД-17_и; 2 – моторна олива М – 10Г_{2к}; 3 – гідравлічна олива МГП – 10

Технологічні фактори, які впливають на зміну інформативних амплітуд, виражені через параметри шорсткості поверхонь тертя (Ra , Sm) рухомого і нерухомого трибоелементів.

На рис. 7 і рис. 8 представлені експериментальні значення зміни об'ємної швидкості зношування, коефіцієнта тертя і відповідну зміну значень пік-факторів кластерів $K2$ і $K3$ при різних навантаженнях N .

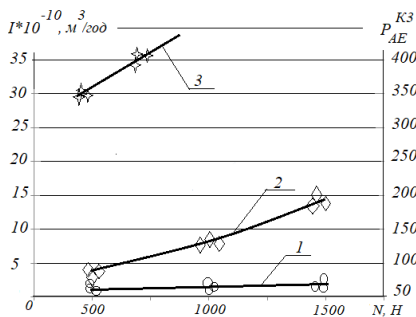


Рис. 7. Залежності зміни об'ємної швидкості зношування та значення пік-фактора кластера $K3$ від навантаження та величини шорсткості поверхонь тертя: 1 – $Ra = 0,1$ мкм; 2 – $Ra = 0,2$ мкм; 3 – $Ra = 0,4$ мкм

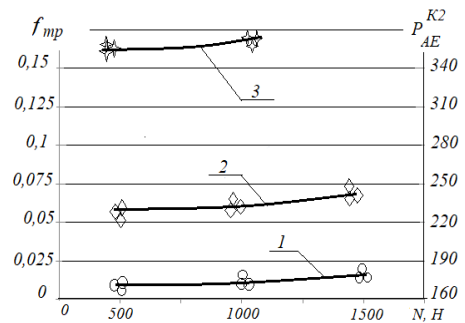


Рис. 8. Залежності зміни коефіцієнта тертя та значення пік-фактора кластера $K2$ від навантаження та величини шорсткості поверхонь тертя: 1 – $Ra = 0,1$ мкм; 2 – $Ra = 0,2$ мкм; 3 – $Ra = 0,4$ мкм

Аналіз значень пік-факторів аналізованих кластерів і значень коефіцієнтів кореляції дозволяє зробити висновок про наявність стійкої кореляції між параметрами тертя та зношування. Коефіцієнт кореляції знаходиться в межах значень 0,86-0,92. Як випливає з представлених залежностей, спостерігається значна зміна значень пік-факторів, що підтверджує робастність обраного методу аналізу акустичного випромінювання із зони тертя.

Зміни параметрів шорсткості, особливо параметра Ra , значно впливає на величину значень пік-факторів. Пік-фактор кластера $K3$ змінюється в межах 60-600 одиниць, пік-фактор кластера $K2$ в межах 170-420 одиниць, що дозволить більш точно ідентифікувати процеси тертя та зношування.

Експлуатаційні фактори, які впливають на зміну інформаційних амплітуд, виражені через параметри навантаження і швидкість ковзання.

На рис. 9 і рис. 10 представлені експериментальні значення зміни об'ємної швидкості зношування, коефіцієнта тертя і відповідну зміну значень пік-факторів кластерів $K2$ і $K3$ при зміні швидкості ковзання $v_{ков}$ на різних навантаженнях N .

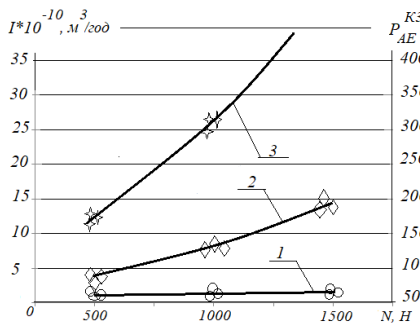


Рис. 9. Залежності зміни об'ємної швидкості зношування та значення пік-фактора кластера $K3$ від навантаження та величини швидкості ковзання: 1 – $v_{ков} = 0,2$ м/с; 2 – $v_{ков} = 0,5$ м/с; 3 – $v_{ков} = 0,8$ м/с

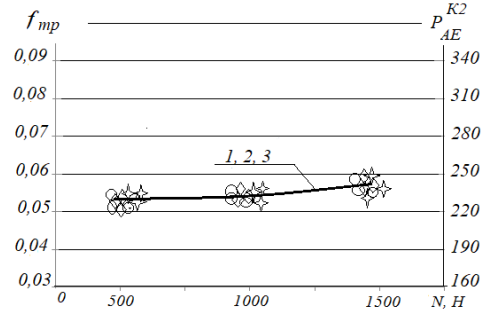


Рис. 10. Залежності зміни коефіцієнта тертя та значення пік-фактора кластера $K2$ від навантаження та величини швидкості ковзання: 1 – $v_{ков} = 0,2$ м/с; 2 – $v_{ков} = 0,5$ м/с; 3 – $v_{ков} = 0,8$ м/с

З аналізу залежностей можна зробити висновок про наявність стійкої кореляції параметрів тертя та зношування з розрахунковими значеннями пік-факторів відповідних кластерів. Особливістю даних досліджень є висока чутливість пік-фактора кластера $K3$ до зміни об'ємної швидкості зношування при зміні швидкості ковзання і низька чутливість до зміни значень пік-фактора кластера $K2$. При цьому, значення коефіцієнта кореляції параметрів тертя та зношування до обраних параметрів акустичної емісії знаходяться в межах 0,8-0,94.

Обговорення результатів дослідження. Аналізуючи представлені залежності на рис. 1 – 10 можна зробити висновок, що кластерний амплітудний аналіз сигналів акустичної емісії з зони тертя трибосистеми на інформативних частотах дозволяє ідентифікувати поверхневі процеси під час зношування, тим самим підвищити робастність методу АЕ. Даний аналіз може бути основою для розробки методики діагностування трибосистем під час їх експлуатації, що дозволить вимірювати швидкість зношування і втрати на тертя в будь-який момент часу експлуатації і розраховувати ресурс трибосистеми.

За результатами експериментальних значень, за допомогою методу найменших квадратів, були отримані регресійні рівняння в натуральних значеннях, які мають такий вигляд.

Для коефіцієнта тертя:

$$f_{тр} = a_2 \cdot P_{AE}^{K2} \cdot \frac{W_{TP}}{W_i}, \quad (5)$$

де a_2 – безрозмірний коефіцієнт, враховує конструкцію трибосистеми і умови експлуатації, визначається експериментально, підвищує адекватність рівняння (5) даним експерименту;

W_{TP} – швидкість роботи дисипації в трибосистемі, визначається за формулами, які наведені в роботі [19], розмірність Дж/с.

Потужність, яка підводиться до трибосистеми, визначається за виразом:

$$W_i = N \cdot v_{ков}, Дж/с, \dots \dots \dots (6)$$

де N – навантаження на трибосистему, Н; $v_{ков}$ – швидкість ковзання, м/с.

Для об'ємної швидкості зношування трибосистеми:

$$I = a_3 \cdot P_{AE}^{K3} \cdot \frac{W_{TP}}{Q_{max}^3} \quad (7)$$

де a_3 – безрозмірний коефіцієнт, враховує конструкцію трибосистеми і умови експлуатації, визначається експериментально, підвищує адекватність рівняння (7) даним експерименту; Q_{max} – добротність трибосистеми після завершення припрацювання, визначається за формулами, які наведено в роботі [20], розмірність Дж/м³.

Регресивні рівняння для визначення коефіцієнта тертя, формула (5) і об'ємної швидкості зношування, формула (7) були перевірені на адекватність результатам експерименту з довірчою ймовірністю 0,95. Отримані рівняння адекватні даним експерименту і в подальшому будуть використані для розробки методики діагностування трибосистем в експлуатації.

Висновки. Встановлено кореляційний зв'язок між значеннями пік-факторів різних кластерів та швидкістю зношування і коефіцієнтом тертя, що підтверджує адекватність математичних моделей розподілу сигналу АЕ на кластери. Показано, що кластерний амплітудний аналіз сигналів акустичної емісії з зони тертя трибосистеми на інформативних частотах дозволяє ідентифікувати поверхневі процеси під час тертя та зношування, тим самим підвищити робастність методу АЕ. Доведено, що даний аналіз може бути основою для розробки методики діагностування трибосистем під час експлуатації. Це дозволить вимірювати швидкість зношування і втрати на тертя, у вигляді коефіцієнта тертя, в будь-який момент часу експлуатації і розраховувати ресурс трибосистеми.

Отримано регресійні рівняння, які дозволяють розраховувати значення коефіцієнта тертя і швидкості зношування трибосистем за результатами моніторингу акустичного випромінювання під час експлуатації в онлайн-режимі. Регресійні рівняння мають змогу адаптуватися до умов проведення діагностування за допомогою зміни коефіцієнтів, які враховують конструкцію трибосистеми і умови експлуатації.

Список літератури

1. Ferrer C., Salas F., Pascal M., Orozco J. Discrete acoustic emission waves during stick-slip friction between steel samples / Tribology International, 2010, No.43, pp.1–6.
2. Шевченка С.А. Класифікація та обґрунтування вимог до акустико-емісійних ознак дефектів пар тертя механізмів / Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім.П.Василенка, 2012, вип.121, с.159-163.
3. Abdullah M., D. Al-Ghamd, Zhechkov, D. Mba. A comparative experimental study on the use of Acoustic Emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size / Mechanical System and Signal Processing, 2006, No.7, pp.1537–1571.
4. Mazal P., V.Koula, F.Hort, F.Vlasic. Applications of continuous sampling of AE signal for detection of fatigue damage / NDT in Progress, 2009, No.4. –8 p.
5. Yanhui Feng. Discrete wavelet-based thresholding study on acoustic emission signals to detect bearing defect on a rotating machine / The Thirteen International Congress of Sound and Vibration. Vienna, Austria, 2-6 July, 2006. –8 p.

6. Faris Elasha., Matthew Greaves, David Mba, Abdulmajid Addali. Application of Acoustic Emission in Diagnostic of Bearing Faults within a Helicopter gearbox / The Fourth International Conference on Through-life Engineering Services. Procedia CIRP, 2015, Vol.38, pp. 30-36.
7. Seyed A. Niknam, Tomcy Thomas, J. Wesley Hines, Rapinder Sawhney. Analysis of Acoustic Emission Data for Bearings subject to Unbalance / International Journal of Prognostics and Health Management, 2013, Vol. 15, pp. 1–10.
8. Badgajar M.P., Patil A.V. Fault Diagnosis of Roller Bearing Using Acoustic Emission Technique and Fuzzy Logic / International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology, 2014, Vol. 3, Issue 4, pp.170–175.
9. Rao V.V., Ratnam Ch. A Comparative Experimental Study on Identification of Defect Severity in Rolling Element Bearings using Acoustic Emission and Vibration Analysis / Tribology in Industry, 2015, Vol. 37, No. 2, pp.176-185.
10. Zahari Taha., Indro Pranoto. Acoustic Emission - Research and Applications. Chapter 4 – Acoustic Emission Application for Monitoring Bearing Defects / InTech. 2013, pp.71–90. <http://dx.doi.org/10.5772/55434>
11. Nienhaus K., Boos F.D., Garate K., Baltes R. Development of Acoustic Emission (AE) based defect parameters for slow rotating roller bearings / Journal of Physics: Conference Series. 364. 2012. 012034. 1-10. doi:10.1088/1742-6596/364/1/012034
12. Yongyong He., Xinming Zhang, Michael I. Friswell. Defect Diagnosis for Rolling Element Bearings Using Acoustic Emission / Journal of Vibration and Acoustics, 2009, Vol. 131 / 061012.
13. Vinogradov A., Yasnikov I.S. On the nature of acoustic emission and internal friction during cyclic deformation of metals / [Acta Materialia](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.02.007), 2014, vol. 70, p. 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.02.007>
14. Songtao Hu, Weifeng Huang, Xi Shi, Zhike Peng, Xiangfeng Liu. Mechanism of bi-Gaussian surface topographies on generating acoustic emissions under a sliding friction / Tribology International, 2019, vol. 131, p. 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.10.015>
15. Войтов В.А., Бекіров А.Ш., Войтов А.В. Вибір інформативних параметрів акустичної емісії для визначення швидкості зношування трибосистем на перехідних режимах. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. 2019. № 15. С. 190–202.
16. Fenenko K.A. Cluster analysis of acoustic emission signals from the friction zone of tribosystems / Problems of Tribology, V. 25, No 2/96-2020, 25-33 DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-96-2-25-33>
17. Vojtov V.A., Fenenko K.A., Voitov A.V. Substantiation of informative amplitudes during registration of acoustic emission signals from the friction zone of tribosystems / Problems of Tribology, 2021, vol. 26, № 1/99, p. 6-12. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-99-1-6-12>
18. Войтов В. А., Фененко К. А., Кравцов А.Г. Експериментальні дослідження інформативних частот акустичної емісії трибосистем при зміні конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів / Проблеми тертя та зношування. 2021. – № 3 (92). – С. 4-16. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(92\).15927](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(92).15927)
19. Войтов В.А., Захарченко М.Б. Моделирование процессов трения изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 1. Расчет скорости работы диссипации в трибосистемах / Проблеми трибології. – 2015. – № 1. – С. 49-57.
20. Vojtov V.A., Voitov A.V. Assessment of the quality factor of tribosystems and relationship with tribological characteristics // Problems of Tribology, V. 25, No 4/98 – 2020, 20-26. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-98-4-20-26>

Стаття надійшла до редакції 22.10.2021.

V. A. VOJTOV, K. A. FENENKO, A. G. KRAVTSOV

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF INFORMATIVE AMPLITUDES OF ACOUSTIC EMISSIONS OF TRIBOSYSTEMS WHEN CHANGING CONSTRUCTIVE, TECHNOLOGICAL AND TACTICAL TACTACES

In the presented work experimental dependences which confirmed adequacy of the developed mathematical models of formation of acoustic emission (AE) from a zone of friction of tribosystems taking into account design, technological and operational factors are received. The distribution of acoustic radiation into clusters with calculation of peak factor values of each cluster is substantiated. Dependences of change of values of peak factors of clusters at change of volume speed of wear and coefficients of friction are received. The correlation between the values of peak factors of different clusters and the wear rate and friction coefficient, which confirms the adequacy of mathematical models of the distribution of the AE signal into clusters. It is established that the cluster amplitude analysis of acoustic emission signals from the friction zone of the tribosystem at informative frequencies allows to identify surface processes during friction and wear, thereby increasing the robustness of the AE method. In this case, the values of the correlation coefficient of the parameters of friction and wear to the selected parameters of acoustic emission are within 0,8-0,96. Regression equations are obtained, which allow to calculate the values of friction coefficient and wear rate of tribosystems based on the results of acoustic radiation monitoring during online operation. Regression equations are able to adapt to the conditions of diagnosis by changing the coefficients that take into account the design of the tribosystem and operating conditions.

It is shown that this analysis can be the basis for the development of methods for diagnosing tribosystems during operation. This will measure the rate of wear and friction losses, in the form of the coefficient of friction, at any time during operation and calculate the life of the tribosystem.

Keywords: tribosystem; acoustic emission; informative frequency; informative amplitude; methods of diagnosis; wear rate; coefficient of friction; robustness of the method, correlation coefficient.

References

1. Ferrer C., Salas F., Pascal M., Orozco J. Discrete acoustic emission waves during stick-slip friction between steel samples / *Tribology International*, 2010, No.43, pp. 1–6.
2. Shevchenko S.A. Kласифікація та обґрунтування вимог до акустико-емісійних ознак дефектів пар тертя механізмів / *Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства ім. П. Василенка*, 2012, вип.121, с. 159-163.
3. Abdullah M., D. Al-Ghamd, Zhechkov, D. Mba. A comparative experimental study on the use of Acoustic Emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size / *Mechanical System and Signal Processing*, 2006, No.7, pp. 1537–1571.
4. Mazal P., V. Koula, F. Hort, F. Vlastic. Applications of continuous sampling of AE signal for detection of fatigue damage / *NDT in Progress*, 2009, No.4. – 8 p.
5. Yanhui Feng. Discrete wavelet-based thresholding study on acoustic emission signals to detect bearing defect on a rotating machine / *The Thirteenth International Congress of Sound and Vibration*. Vienna, Austria, 2-6 July, 2006. – 8 p.
6. FarisElasha., Matthew Greaves, David Mba, Abdulmajid Addali. Application of Acoustic Emission in Diagnostic of Bearing Faults within a Helicopter gearbox / *The Fourth International Conference on Through-life Engineering Services*. Procedia CIRP, 2015, Vol.38, pp. 30-36.
7. Seyed A. Niknam, Tomcy Thomas, J. Wesley Hines, Rapinder Sawhney. Analysis of Acoustic Emission Data for Bearings subject to Unbalance / *International Journal of Prognostics and Health Management*, 2013, Vol. 15, pp. 1–10.
8. Badgujar M.P., Patil A.V. Fault Diagnosis of Roller Bearing Using Acoustic Emission Technique and Fuzzy Logic / *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, 2014, Vol. 3, Issue 4, pp. 170–175.

9. Rao V.V., Ratnam Ch. A Comparative Experimental Study on Identification of Defect Severity in Rolling Element Bearings using Acoustic Emission and Vibration Analysis / *Tribology in Industry*, 2015, Vol. 37, No. 2, pp. 176-185.

10. Zahari Taha., Indro Pranoto. Acoustic Emission - Research and Applications. Chapter 4 – Acoustic Emission Application for Monitoring Bearing Defects / *In Tech*. 2013, pp. 71–90. <http://dx.doi.org/10.5772/55434>

11. Nienhaus K., Boos F.D., Garate K., Baltes R. Development of Acoustic Emission (AE) based defect parameters for slow rotating roller bearings / *Journal of Physics: Conference Series*. 364. 2012. 012034. 1-10. doi:10.1088/1742-6596/364/1/012034

12. Yongyong He., Xinming Zhang, Michael I. Friswell. Defect Diagnosis for Rolling Element Bearings Using Acoustic Emission / *Journal of Vibration and Acoustics*, 2009, Vol. 131 / 061012.

13. Vinogradov A., Yasnikov I.S. On the nature of acoustic emission and internal friction during cyclic deformation of metals / *Acta Materialia*, 2014, vol. 70, p. 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.02.007>

14. Songtao Hu, Weifeng Huang, Xi Shi, Zhike Peng, Xiangfeng Liu. Mechanism of bi-Gaussian surface topographies on generating acoustic emissions under a sliding friction / *Tribology International*, 2019, vol. 131, p. 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.10.015>

15. Vojtov V.A., Biekurov A.SH., Voitov A.V. Vybir informatyvnykh parametriv akustychnoyi emisiyi dlya vyznachennya shvydkosti znoshuvannya tribosystem na perekhidnykh rezhymakh. *Tekhnichnyy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*. 2019. № 15. s. 190–202.

16. Fenenko K.A. Cluster analysis of acoustic emission signals from the friction zone of tribosystems / *Problems of Tribology*, V. 25, No 2/96-2020, 25-33 DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-96-2-25-33>

17. Vojtov V.A., Fenenko K.A., Voitov A.V. Substantiation of informative amplitudes during registration of acoustic emission signals from the friction zone of tribosystems / *Problems of Tribology*, 2021, vol. 26, № 1/99, p. 6-12. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-99-1-6-12>

18. Vojtov V. A., Fenenko K. A., Kravtsov A.H. Eksperymental'ni doslidzhennya informatyvnykh chastot akustychnoyi emisiyi trybosystem pry zmini konstruktyvnykh, tekhnolohichnykh ta ekspluatatsiynykh faktoriv / *Problemy tertya ta znoshuvannya*. 2021. – № 3 (92). – S. 4-16. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(92\).15927](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(92).15927)

19. Vojtov V.A., Zakharchenko M.B. Modelirovaniye protsessov treniya iznashivaniya v tribosistemakh v usloviyakh granichnoy smazki. Chast' 1. Raschet skorosti raboty dissipatsii v tribosistemakh / *Problemi tribologii*. – 2015. – № 1. – S. 49-57.

20. Vojtov V.A., Voitov A.V. Assessment of the quality factor of tribosystems and relationship with tribological characteristics // *Problems of Tribology*, V. 25, No 4/98 – 2020, 20-26. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-98-4-20-26>

Войтов Віктор Анатолійович – д.т.н., проф., завідувач кафедри транспортних технологій і логістики, Державний біотехнологічний університет, vavoitovva@gmail.com.

Фененко Катерина Андріївна – аспірантка кафедри транспортних технологій і логістики, Державний біотехнологічний університет, zinochka2503@ukr.net.

Кравцов Андрій Григорович – к.т.н., доц., доцент кафедри транспортних технологій і логістики, Державний біотехнологічний університет, kravcov84@gmail.com.