

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.3(92).15927

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

*Державний біотехнологічний університет, Україна***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАТИВНИХ ЧАСТОТ
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. За результатами досліджень розроблено рейтинг факторів, які впливають на формування величин інформативних частот АЕ та межі діапазону їх випромінювання. На першому місці, по ступеню впливу, знаходяться експлуатаційні фактори – швидкість ковзання та навантаження. Інформативні частоти знаходяться в смузі 110-600 кГц. На другому місці конструктивний фактор – величина площі тертя. Інформативні частоти знаходяться в смузі 120-580 кГц. На третьому місці технологічні фактори – шорсткість поверхонь тертя, R_a та S_m . Інформативні частоти знаходяться в смузі 120-650 кГц. На четвертому місці матеріали трибоелементів та трибологічні властивості змащувальних матеріалів. Інформативні частоти знаходяться в смузі 210-420 кГц.

Аналіз отриманих залежностей підтверджує теоретичний висновок, що вибір інформативних частот сигналів акустичної емісії з урахуванням конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів дозволить підвищити робастність і інформативність методу АЕ в процесі діагностування. Даний аналіз може бути основою для розробки методики діагностування трибосистем під час їх експлуатації.

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

Вступ. Одним з найбільш ефективних методів діагностування трибосистем є метод акустичної емісії (АЕ). Акустичні коливання при терті генеруються ударною взаємодією шорсткостей і пружньопластичною деформацією поверхонь, що труться, процесами руйнування фрикційних зв'язків і структурно-фазовою перебудовою поверхневих шарів матеріалів, утворенням і розвитком тріщин в поверхневих шарах взаємодіючих тіл, відділенням частинок зносу. Як відомо, 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.

В даний час під акустичною емісією розуміється вторинний процес, що представляє собою суперпозицію сигналів від величезного числа елементарних джерел АЕ, тобто акустичне випромінювання є наслідком колективних процесів структурних одиниць (дефектів структури матеріалу). Більш того, вважається, що цей вторинний процес є результатом інтерференції первинних акустичних хвиль, які відповідають умові когерентності.

Аналіз останніх публікацій по даній проблемі. В роботі [1] обґрунтована і запропонована онлайн-система моніторингу промислових вузлів тертя на базі акустичної емісії. Автори стверджують, що така система здатна класифікувати ступінь зносу і може запобігати катастрофічним відмовам під час експлуатації. Програмне забезпечення включає оцінку терміну експлуатації різних промислових компонентів, а також появу задири і раптових відмов.

Робота [2] присвячена перспективам застосування акустико-емісійного аналізу, як ефективного методу діагностики в сучасному трибомоніторингу. На основі великої кількості експериментальних досліджень, встановлено взаємозв'язок між параметрами АЕ, зношуванням і коефіцієнтом тертя. У статті розроблена теоретична модель, яка підтверджує кореляцію параметрів акустичної емісії з параметрами тертя ковзання. Модель побудована на припущенні, що контакт матеріалів на фактичних плямах – пружний. Встановлено, що швидкість ковзання, навантаження і кількість плям фактичного контакту впливають на енергію сигналу АЕ. За допомогою цієї моделі, за результатами вимірювання АЕ, можна оцінити контактне навантаження, що є критичним параметром для прогнозування ресурсу в експлуатації.

Робота [3] посвячена реєстрації та аналізу сигналів АЕ. Для обробки сигналів використовувалося швидке перетворення Фур'є з аналізом частотних діапазонів. Були отримані такі параметри, як потужність, середньоквадратична амплітуда, середня частота і енергія сигналів. Між отриманими параметрами АЕ та параметрами тертя та зношування встановлено кореляційний зв'язок. Авторами доведено, що для діагностування швидкості зношування і коефіцієнта тертя необхідно реєструвати сигнали АЕ на різних частотах. Такий підхід підвищить інформативність методу.

Аналіз сигналів акустичної емісії на різних частотах застосований в роботі [4], де використовувалися широкопasmові датчики АЕ. Автори відзначають, що під час діагностування вузлів тертя, особливо при наявності проковзування між поверхнями тертя, частоти сигналів, що генеруються перевищують 700 кГц.

В роботі [5] представлені результати вимірювання сигналу АЕ із зони тертя при зміні швидкості ковзання. Авторами встановлено, що при частотному аналізі сигналів АЕ характерні частотні складові значно збільшуються під час збільшення швидкості ковзання. За отриманими даними також були розраховані енергія сигналів АЕ і робота тертя. В процесі проведення експериментів встановлено кореляційний зв'язок між сигналами АЕ і швидкістю ковзання.

В роботі [6] виконано аналіз частотної складової сигналу АЕ із зони тертя. Авторами встановлено, що сигнали АЕ, які генерує пара тертя, відповідають частоті понад 30 кГц. Саме це значення обрано за нижню частоту зрізу фільтрів апаратури. Досліджуючи експериментальні графіки амплітудно-частотних характеристик сигналів автоматичної експозиції в діапазоні 30 кГц – 1 МГц, авторами встановлено, що максимальні значення амплітуд знаходяться в області частот 80 – 100 кГц.

Авторами роботи [7] встановлено, що сигнал АЕ із зони тертя має два характерних типи фреївів, кожен з яких має свої джерела. Перший з них характеризується зростанням медіанної частоти і амплітуди в області 80 – 240 кГц і характерний для відділення частинок зносу. Другий – характерний для частот 30–40 кГц без викидів амплітуди і характерний для інтенсивної і несталого пластичної деформації.

У роботах [8-10] виконано аналіз частотної складової сигналу АЕ для різних сплавів при пластичній деформації. Авторами встановлено частотні діапазони, в яких виявляються максимальні значення амплітуд: пластична деформація 50 – 200 кГц; процеси двойникування 200 – 500 кГц; мартенситні перетворення 250 – 400 кГц; стрибки тріщин 250 – 600 кГц. Авторами робиться висновок, що максимальні амплітуди сигналів характерні для процесів двойникування і стрибкоподібного зростання тріщин.

У роботах [11-15] встановлено кореляційний зв'язок між активністю акустичної емісії і швидкістю деформації. Авторами робиться висновок, що при дослідженні потоку акустичних сигналів при пластичній деформації можна обмежити верхню частотну межу 400 – 600 кГц. Наведені в роботах дані свідчать, що амплітуда сигналу може характеризувати щільність невідповідних, взаємозалежних елементарних деформаційних подій при пластичній деформації металевих матеріалів і корелює зі швидкістю деформації, розмірність с^{-1} .

На підставі виконаного аналізу робіт, присвячених вибору інформативних параметрів АЕ для діагностики трибосистем, можна зробити висновок, що для підвищення робастності методу найбільш перспективним підходом може виступати виділення інформативних частотних смуг в фреймі сигналу АЕ та визначення в даній частотній смузі пік-фактора сигналу. Такий підхід дозволить отримати інформацію про окрему групу процесів, що відбуваються в поверхневих шарах матеріалів трибосистеми, що підвищить робастність даного методу і інформативність діагностування трибосистем.

Мета дослідження. Метою експериментальних лабораторних випробувань є підтвердження адекватності розроблених математичних моделей формування частоти акустичного випромінювання із зони тертя трибосистем з урахуванням конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів.

Методичний підхід в проведенні досліджень. Виходячи з висновків роботи [16], представимо вираз для розрахунку інформативної частоти, яка буде генеруватися трибосистемою в процесі роботи:

$$f_{AE(n)} = n_{фнк} \cdot \dot{\epsilon}_n \cdot (1 + \mu_n) \cdot (1 - 2\mu_n), \quad (1)$$

де $f_{AE(n)}$ – інформативна частота сигналів АЕ із зони тертя нерухомого трибоелемента, на якому встановлено датчик АЕ, розмірність с^{-1} ; $n_{фнк}$ – сумарна кількість плям фактичного контакту на поверхні тертя трибоелемента з меншою площею тертя; $\dot{\epsilon}$ – значення швидкості деформації на одиничній плямі контакту матеріалу нерухомого трибоелемента, розмірність с^{-1} ; μ – коефіцієнт Пуасона матеріалу нерухомого трибоелемента.

Методика розрахунку кількості плям контакту $n_{фнк}$ на меншій поверхні тертя F_{min} одного з трибоелементів, а також значень швидкості деформації матеріалу на одиничній плямі контакту, наведена в роботі [17].

Експериментальна установка з кінематичною схемою контакту «кільце-кільце» представлена на рис. 1, блок схема експериментального устаткування для реєстрації та обробки сигналів АЕ із зони тертя, представлена на рис. 2.

Сигнал АЕ із зони тертя реєструється широкосмуговим датчиком GT300 (100 – 800 кГц), рис. 2, який встановлювався на нерухомий трибоелемент, передавався на підсилювач, потім, в аналоговому вигляді, на USB-осцилограф

PV6501, який виконує функції аналогово-цифрового перетворювача і аналізатора частоти спектра одночасно. Після обробки в USB-осцилографі сигнал в цифровому коді надходить в комп'ютер, де обробляється спеціальним програмним забезпеченням.



Рис. 1. Кінематична схема контакту «кільце-кільце»: 1 – рухоме кільце; 2 – нерухоме кільце; 3 – датчик акустичної емісії

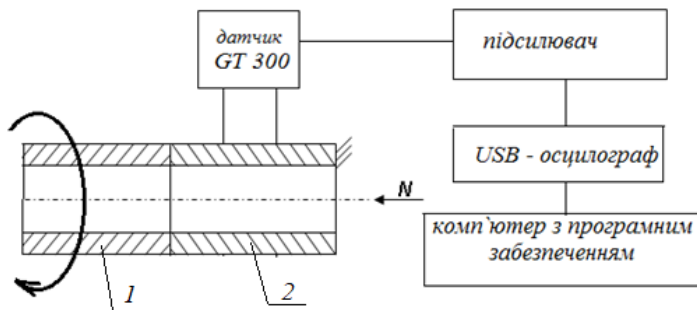


Рис. 2. Блок-схема експериментального устаткування для реєстрації та обробки сигналів АЕ: 1 – рухомий трибоелемент; 2 – нерухомий трибоелемент; N – навантаження

Нижня смуга пропускання сигналу становить 50 кГц, що не дозволяє реєструвати сигнали від випробувального обладнання (машини тертя). Верхня смуга пропускання сигналу дорівнює 1,5 МГц.

Смуга пропускання USB-осцилографа, рис.2, становить 20 МГц, що багаторазово перевищує обрану робочу смугу пропускання сигналу. Таким чином, за допомогою фільтрів низьких і високих частот в проведених дослідженнях реєстрували і аналізували сигнал АЕ із зони тертя в смузі 50 – 1500 кГц.

USB-осцилограф працює в режимі очікування і запускається по команді на час реєстрації, час реєстрації дорівнює 1×10^{-3} с. Такий час було вибрано на підставі аналізу сигналу АЕ на сталому режимі за допомогою автокореляційної функції.

Експериментальні дослідження проводилися для трибосистем, які аналогічні обраним конструкціям для моделювання, що представлено в роботі [16]. Режимми випробувань: навантаження $N = 500 - 1500$ Н; швидкість ковзання $v_{ков} = 0,2$

– 0,8 м/с. В процесі експериментів реєстрували інформативні частоти, на яких спостерігалися максимальні значення амплітуд.

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. Ступінь мінливості результатів вимірювань сигналів АЕ для різних конструкцій трибосистем і умов їх експлуатації оцінювалася за допомогою коефіцієнта варіації.

Результати досліджень. Результати експериментальних досліджень щодо відповідності теоретичних і експериментальних інформативних частот із зони тертя представлені на рис. 3 - 8. Суцільні криві відображають результати моделювання в залежності від різних факторів. Точки на полі графіка відображають середні значення інформативних частот на сталому режимі роботи трибосистеми (після завершення припрацювання) на різних навантаженнях. Під інформативними частотами будемо розуміти смугу частот, де спостерігаються максимальні значення амплітуд.

На рис. 3 наведено теоретичні та експериментальні значення зміни інформативної частоти АЕ, $f_{AE(n)}$ нерухомого трибоелемента при зміні площі тертя F_{mp} для різних навантажень. Трибосистема «сталь 40X+Бр.АЖ 9-4», змащувальне середовище – моторна олива М-10Г_{2к}. ($E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³). 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 рухомого трибоелемента, сталь 40X, у всіх трьох конструкціях складала $F_{max} = 0,0003$ м². Швидкість ковзання $v_{ков} = 0,5$ м/с.

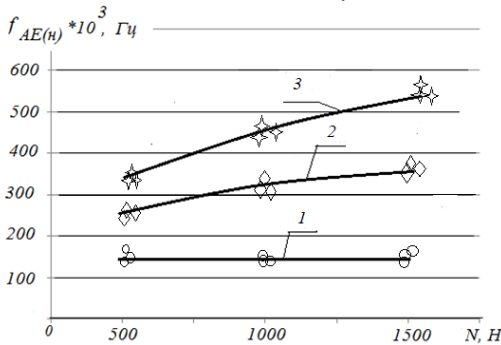


Рис. 3. Теоретичні та експериментальні значення зміни інформативної частоти АЕ $f_{AE(n)}$ нерухомого трибоелемента при зміні площі тертя F_{mp} для різних навантажень: 1 – $F_{mp} = 0,00006$ м²; 2 – $F_{mp} = 0,00015$ м²; 3 – $F_{mp} = 0,00024$ м²

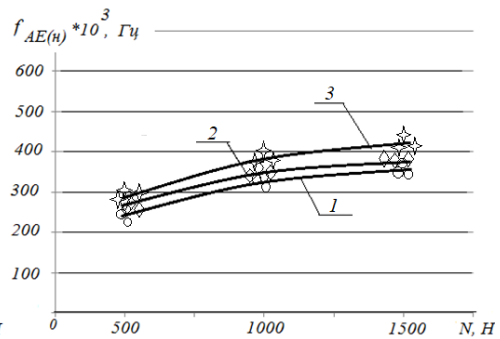


Рис. 4. Теоретичні та експериментальні значення зміни інформативної частоти АЕ $f_{AE(n)}$ нерухомого трибоелемента при різних навантаженнях N та зміні сполучених матеріалів в трибосистемі: 1 – сталь 40X + сталь 40X; 2 – сталь 40X + Бр.АЖ 9-4; 3 – сталь 40X + СЧМ

Результати отриманого масиву експериментальних значень були перевірені на відповідність нормальному закону розподілу та після підтвердження відповідності, розраховано значення критерію Кохрена. Порівняння розрахункових значень критерію Кохрена G_p і табличних значень G_m , для даних умов експери-

менту, дозволяє стверджувати, що отримані експериментальні результати однорідні і відтворювані.

Отримані експериментальні результати підтверджують результати моделювання [16] про значний вплив площі тертя на частоту сигналу, що генерується трибосистемою. Збільшення площі тертя збільшує інформативну частоту сигналів АЕ із зони тертя. Пов'язано це зі збільшенням кількості фактичних плям контакту – $n_{фнк}$, формула (1). Наприклад, при $F_{mp} = 0,00006 \text{ м}^2$, навантаженню $N = 1500 \text{ Н}$ і швидкості ковзання $v_{ков} = 0,5 \text{ м/с}$, кількість $n_{фнк} = 617$. При збільшенні площі тертя до значень $F_{mp} = 0,00024 \text{ м}^2$, при незмінних умовах роботи трибосистеми, кількість $n_{фнк} = 1550$. Кількість фактичних плям контакту, згідно формули (1), впливає на частоту акустичного сигналу, що генерується.

Аналіз значень коефіцієнта варіації дозволяє стверджувати про значний вплив конструктивного фактора (F_{mp}) на генерування інформативної частоти трибосистемою. Зі збільшенням площі тертя значення коефіцієнта варіації збільшується з $v_f = 2,5\%$ до значень $27,7\%$. Це свідчить про розширення діапазону інформативних частот, що генеруються трибосистемою при одночасному збільшенні середнього значення частоти сигналу АЕ. Розрахунок коефіцієнта варіації при зміні площі тертя від мінімальної величини до максимальної, для даних умов експерименту, показує, що коефіцієнт варіації становить $v_f = 65,7\%$.

Отримані експериментальні результати підтверджують теоретичний висновок про необхідність розрахунку інформативних частот при розробці методик діагностування з урахуванням площі тертя, на якій буде встановлено датчик прийому сигналів АЕ.

Другим конструктивним фактором, що характеризує трибосистему, є поєднання матеріалів рухомого і нерухомого трибоелементів. На рис. 4 представлені теоретичні і експериментальні значення зміни інформативної частоти АЕ нерухомого трибоелемента $f_{АЕ(н)}$ при різних навантаженнях N для різного сполучення матеріалів в трибосистемі. Випробуванню підлягали наступні конструкції трибосистем: сталь 40Х + сталь 40Х; сталь 40Х + Бр.АЖ 9-4; сталь 40Х + СЧМ. Для всіх конструкцій рухомий трибоелемент було виготовлено зі сталі 40Х (HRC 52-54). На нерухомому трибоелементі було встановлено датчик АЕ.

Умови проведення експерименту. Змащувальне середовище – моторна олива М-10Г_{2к}. ($E_y = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$). Шорсткість поверхонь тертя $Ra = 0,2 \text{ мкм}$; $Sm = 0,4 \text{ мм}$. Кінематична схема трибосистем «кільце-кільце», площа нерухомого трибоелемента $F_{mp} = 0,00015 \text{ м}^2$; площа рухомого трибоелемента $F_{max} = 0,0003 \text{ м}^2$; швидкість ковзання $v_{ков} = 0,5 \text{ м/с}$.

Порівняння розрахункових значень критерію Кохрена G_p та табличних значень G_m , для даних умов експерименту, дозволяє стверджувати, що отримані експериментальні результати однорідні і відтворювані.

Представлені результати експериментальних досліджень підтверджують результати моделювання [16] і дозволяють зробити висновок про незначний вплив сполучених матеріалів в трибосистемі на величини інформативних частот. Коефіцієнт варіації постійний і знаходиться в межах $v_f = 19,6 - 19,8\%$. Це свідчить про незначний діапазоні інформативних частот, що генеруються трибосистемою. Зміна коефіцієнта варіації при зміні всіх розглянутих поєднань матеріалів в трибосистемі становить $v_f = 33,3\%$.

Третім конструктивним фактором, що характеризує трибосистему, є трибологічні властивості змащувального середовища. На рис. 5 представлено теоре-

тичні та експериментальні значення зміни інформативної частоти АЕ $f_{AE(n)}$ нерухомого трибоелемента при різних навантаженнях N та різних змащувальних середовищах: гідравлічна олива МГП – 10 ($E_y = 1,8 \cdot 10^{14}$ Дж/м³); моторна олива М – 10Г_{2к} ($E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³); трансмісійна олива ТАД-17_и ($E_y = 6,3 \cdot 10^{14}$ Дж/м³).

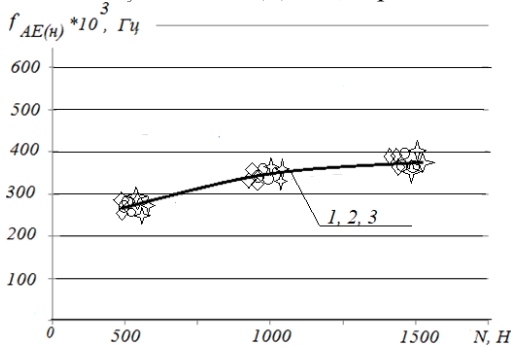


Рис. 5. Теоретичні та експериментальні значення зміни інформативної частоти АЕ $f_{AE(n)}$ нерухомого трибоелемента при різних навантаженнях N та різних змащувальних середовищах: 1 – гідравлічна олива МГП – 10; 2 – моторна олива М – 10Г_{2к}; 3 – трансмісійна олива ТАД-17_и

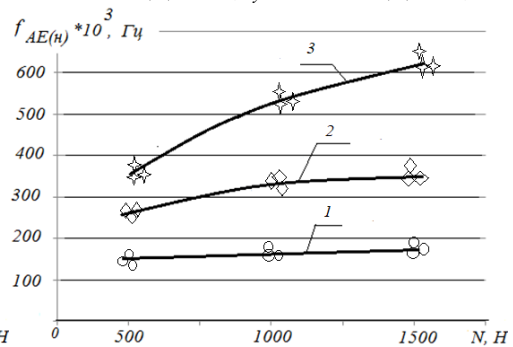


Рис. 6. Теоретичні та експериментальні значення зміни інформативної частоти АЕ $f_{AE(n)}$ нерухомого трибоелемента при різних навантаженнях N та шорсткості Ra поверхонь тертя: 1 – $Ra=0,1$ мкм; 2 – $Ra=0,2$ мкм; 3 – $Ra=0,4$ мкм

Умови проведення експерименту. Сполучені матеріали в трибосистемі: сталь 40Х+Бр.АЖ 9-4. Шорсткість поверхонь тертя $Ra = 0,2$ мкм; $Sm = 0,4$ мм. Кінематична схема трибосистеми «кільце-кільце», площа нерухомого трибоелемента $F_{mp} = 0,00015$ м²; площа рухомого трибоелемента $F_{max} = 0,0003$ м²; швидкість ковзання $v_{ков} = 0,5$ м/с.

Порівняння розрахункових значень критерію Кохрена G_p та табличних значень G_m , для даних умов експерименту, дозволяє стверджувати, що отримані експериментальні результати однорідні і відтворювані.

Представлені результати експериментальних досліджень підтверджують результати моделювання і дозволяють зробити висновок про незначний вплив трибологічних властивостей змащувального середовища на величини інформативних частот. Коефіцієнт варіації постійний і знаходиться на рівні $v_f = 15,1\%$. Це свідчить про вузький діапазон інформативних частот, що генеруються трибосистемою при використанні різних змащувальних середовищ. Значення коефіцієнта варіації при зміні трибологічних властивостей мастильних матеріалів у всьому діапазоні досліджень становить $v_f = 15,8\%$.

Оцінюючи вплив конструктивних факторів трибосистеми на величини інформативних частот і діапазон їх варіації, можна стверджувати, що найбільш значущим фактором є величина площі тертя нерухомого трибоелемента, $v_f = 65,7\%$. Даний фактор необхідно враховувати при розробці методик діагностування трибосистем.

Технологічні фактори, які впливають на зміну інформативної частоти, представлено параметрами шорсткості поверхонь тертя (Ra , Sm) рухомого та нерухомого трибоелементів.

На рис. 6 та рис. 7 представлено теоретичні та експериментальні значення зміни інформативної частоти АЕ $f_{AE(n)}$ нерухомого трибоелемента при різних

навантаженнях N та шорсткості Ra поверхонь тертя, рис. 6 і середнього кроку нерівностей Sm поверхонь тертя, рис. 7.

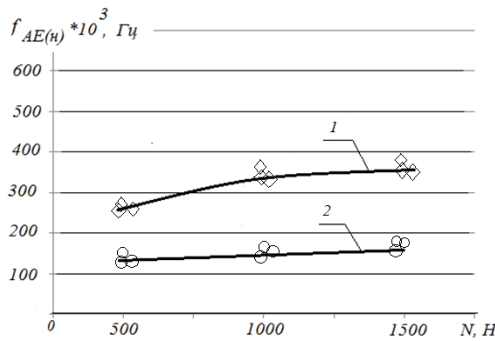


Рис. 7. Теоретичні та експериментальні значення зміни інформативної частоти АЕ $f_{AE(N)}$ нерухомого трибоелемента при різних навантаженнях N та зміні середнього кроку нерівностей Sm поверхонь тертя: 1 – $Sm=0,4$ мм; 2 – $Sm=0,5$ мм

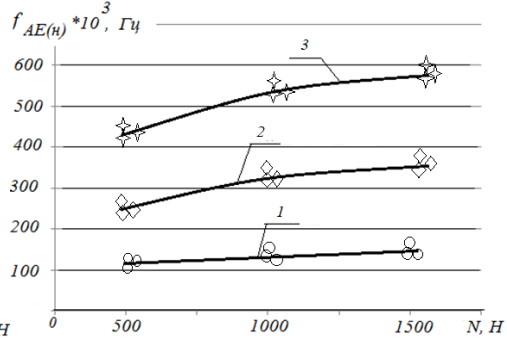


Рис. 8. Теоретичні та експериментальні значення зміни інформативної частоти АЕ $f_{AE(N)}$ нерухомого трибоелемента при різних навантаженнях N та зміні швидкості ковзання $v_{ков}$: 1 – $v_{ков}=0,2$ м/с; 2 – $v_{ков}=0,5$ м/с; 3 – $v_{ков}=0,8$ м/с

Умови проведення експерименту. Сполучені матеріали в трибосистемі: сталь 40Х+Бр.АЖ 9-4. Кінематична схема трибосистем «кільце-кільце», площа нерухомого трибоелемента $F_{mp}=0,00015$ м²; площа рухомого трибоелемента $F_{max}=0,0003$ м²; швидкість ковзання $v_{ков}=0,5$ м/с. Шорсткість поверхонь тертя: $Ra=0,1$ мкм; $Ra=0,2$ мкм; $Ra=0,4$ мкм. Середній крок нерівностей: $Sm=0,4$ мм; $Sm=0,5$ мм.

Порівняння розрахункових значень критерію Кохрена G_p та табличних значень G_m , для даних умов експерименту, дозволяє стверджувати, що отримані експериментальні результати однорідні і відтворювані.

Результати експериментальних досліджень підтверджують результати моделювання і дозволяють зробити висновок про значний вплив шорсткості поверхонь тертя на величини інформативних частот. При зміні величини $Ra=0,1$ мкм до величини $Ra=0,4$ мкм, коефіцієнт варіації збільшується від значення $v_f=4,5\%$ до величини $v_f=26,5\%$. При зміні величини $Sm=0,4$ мм до величини $Sm=0,5$ мм, коефіцієнт варіації зменшується від значення $v_f=19,6\%$ до величини $v_f=4,6\%$. Це свідчить про широкий діапазон інформативних частот, що генеруються трибосистемою при зміні параметрів шорсткості поверхонь тертя.

Значення коефіцієнта варіації при зміні параметра шорсткості Ra у всьому діапазоні досліджень становить $v_f=62,5\%$, при зміні параметра Sm у всьому діапазоні досліджень, становить $v_f=50,0\%$.

Експлуатаційні фактори, які впливають на зміну інформативної частоти, виражені через параметри: навантаження і швидкість ковзання.

На рис. 8 представлено теоретичні і експериментальні значення зміни інформативної частоти АЕ нерухомого трибоелемента $f_{AE(N)}$ при зміні швидкості ковзання $v_{ков}$ на різних навантаженнях N .

Умови проведення експерименту. Сполучені матеріали в трибосистемі: сталь 40Х+Бр.АЖ 9-4. Кінематична схема трибосистеми «кільце-кільце», площа нерухомого трибоелемента $F_{mp}=0,00015$ м²; площа рухомого трибоелемента $F_{max}=0,0003$ м². Шорсткість поверхонь тертя: $Ra=0,2$ мкм; $Sm=0,4$ мм. Змашувальне

середовище - моторна олива М – 10Г_{2к} ($E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³). Швидкість ковзання змінювалася в діапазоні: $v_{ков} = 0,2$ м/с; $v_{ков} = 0,5$ м/с; $v_{ков} = 0,8$ м/с.

Порівняння розрахункових значень критерію Кохрена G_p та табличних значень G_m , для даних умов експерименту, дозволяє стверджувати, що отримані експериментальні результати однорідні і відтворювані.

Результати експериментальних досліджень підтверджують значний вплив швидкості ковзання на величини інформативних частот. При зміні величини швидкості ковзання коефіцієнт варіації знаходиться в межах $v_f = 18,5 - 20,5\%$. Це свідчить про широкий діапазон зміни інформативних частот, що генеруються трибосистемою при зміні експлуатаційних факторів. Пов'язано це зі збільшенням швидкості деформації матеріалів трибоелементів на фактичних плямах контакту $\dot{\epsilon}_n$, формула (1). Наприклад, при $v_{ков} = 0,2$ м/с, навантаженню $N = 1500$ Н, швидкість деформації матеріалу нерухомого трибоелемента дорівнює $\dot{\epsilon}_n = 300,1$ с⁻¹. При збільшенні швидкості ковзання до значень $v_{ков} = 0,8$ м/с, при незмінних умовах роботи трибосистеми, швидкість деформації матеріалу нерухомого трибоелементу складає $\dot{\epsilon}_n = 1200$ с⁻¹. Величина швидкості деформації впливає на частоту акустичного сигналу, що генерує трибосистема, формула (1).

Значення коефіцієнта варіації при зміні швидкості ковзання в діапазоні від $v_{ков} = 0,2$ м/с до $v_{ков} = 0,8$ м/с, дорівнює $v_f = 69,0\%$.

Обговорення результатів дослідження. Результати проведених експериментальних лабораторних випробувань підтвердили адекватність розроблених математичних моделей формування акустичного випромінювання із зони тертя трибосистем з урахуванням конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів, які наведено в роботі [16]. За результатами досліджень можна розробити рейтинг факторів, які впливають на формування величин інформативних частот АЕ та межі діапазону їх випромінювання.

На першому місці, по ступеню впливу, знаходиться експлуатаційні фактори – швидкість ковзання та навантаження. Значення коефіцієнта варіації при зміні даних факторів мають максимальне значення та дорівнює 69,0%. Інформативні частоти знаходяться в смузі 110-600 кГц.

На другому місці, по ступеню впливу, знаходиться конструктивний фактор – величина площі тертя. Значення коефіцієнта варіації при зміні цього фактора дорівнює 65,7%. Інформативні частоти знаходяться в смузі 120-580 кГц.

На третьому місці, по ступеню впливу, знаходяться технологічні фактори – шорсткість поверхонь тертя, Ra та Sm . Значення коефіцієнта варіації при зміні Ra дорівнює 62,5%, при зміні Sm – 50,0%. Інформативні частоти знаходяться в смузі 120-650 кГц.

На четвертому місці, по ступеню впливу, знаходяться матеріали трибоелементів та трибологічні властивості змащувальних матеріалів, які відносяться до конструктивних факторів. Значення коефіцієнта варіації при зміні сполучених матеріалів в трибосистемі дорівнює 33,3%, при зміні трибологічних властивостей змащувального матеріалу – 15,8%. Інформативні частоти знаходяться в смузі 210-420 кГц.

Висновки. Отримано експериментальні залежності які підтвердили адекватність розроблених математичних моделей формування акустичного випромінювання із зони тертя трибосистем з урахуванням конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. За результатами досліджень розроблено рей-

тинг факторів, які впливають на формування величин інформативних частот АЕ та межі діапазону їх випромінювання.

Аналіз отриманих залежностей підтверджує теоретичний висновок, що вибір інформативних частот сигналів акустичної емісії з урахуванням конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів дозволить підвищити робастність і інформативність методу АЕ в процесі діагностування. Даний аналіз може бути основою для розробки методики діагностування трибосистем під час їх експлуатації.

Список літератури

1. Pushkar Deshpande, Vigneashwara Pandiyan, Bastian Meylan, Kilian Wasmer. Acoustic emission and machine learning based classification of wear generated using a pin-on-disc tribometer equipped with a digital holographic microscope / *Wear*, 2021, vol. 476, p. 612-618. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203622>.
2. Yibo Fan, Fengshou Gu, Andrew Ball. Modelling acoustic emissions generated by sliding friction / *Wear*, 2010, vol. 268, p. 811-815. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.12.010>.
3. Zhe Geng, Debashis Pahan, Tom Reddyhoff. Using acoustic emission to characterize friction and wear in dry sliding steel contacts / *Tribology International*, 2019, vol. 134, p. 394-497. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.014>.
4. Kassahun Asamene, Mannur Sundaresan. Analysis of experimentally generated friction related acoustic emission signals / *Wear*, 2012, vol. 296, p. 607-618. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.07.019>.
5. Hiroo Taura, Kazuki Nakayama. Behavior of acoustic emissions at the onset of sliding friction / *Tribology International*, 2018, vol. 123, p. 155-160. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.025>.
6. Баранов А.В., Вагнер В.А., Барсуков Г.В. Диагностика работы пар трения / *Ползуновский вестник*, 2005, №2(ч.2), с. 149-152.
7. Колубаев Е.А., Рубцов В.Е., Колубаев А.В. Особенности излучения акустического сигнала при сухом трении скольжения / *Обработка металлов. Исследования по ФЦП*, 2013, №1(58), с.69-74.
8. Vinogradov A., Lazarev A., Linderov M., Weidner A., Biermann H. Kinetics of deformation processes in high-alloyed cast transformation-induced plasticity/twinning-induced plasticity steels determined by acoustic emission and scanning electron microscopy: Influence of austenite stability on deformation mechanisms / *Acta Materialia*, 2013, Vol. 61, №7. P. 2434-2449.
9. Linderov M., Segel C., Weidner A., Biermann H., Vinogradov A. Deformation mechanisms in austenitic TRIP/TWIP steels at room and elevated temperature investigated by acoustic emission and scanning electron microscopy / *Materials Science and Engineering: A*. 2014, Vol. 597. P. 183-193.
10. Müller A., Segel C., Linderov M., Vinogradov A., Weidner A., Biermann H. The Portevin-Le Châtelier effect in a metastable austenitic stain-less steel / *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016. Vol. 47. №1. P. 59-74.
11. Макаров, С.В., Плотников В.А., Колубаев Е.А. Деформационное поведение алюминиево-магниевого сплава в условиях термомеханического нагружения / *Известия АлтГУ*. – 2015. – № 2. – С. 36–39.
12. Макаров, С.В., Плотников В.А., Лысиков М.В. и др. Накопление деформации и акустическая эмиссия в условиях термомеханического нагружения алюминиево-магниевого сплава / *Известия АлтГУ*. 2015, № 2. С. 40–44.
13. Makarov, S.V., Plotnikov V.A., Lysikov M.V. et al. Acoustic emission and effect of stepwise deformation in aluminum-magnesium alloy / *Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures AIP Conf. Proc.* 2015. 1683, 020138-1–020138-5.

14. Макаров, С.В., Плотников В.А., Колубаев Е.А. Закономерности акустической эмиссии в условиях пластической деформации алюминийно-магниевого сплава при неизотермическом нагружении / Известия АлтГУ. 2014. № 1. С. 252–256.

15. Makarov, S.V., Lysikov M.V., Kolubaev E.A. et al. The deformation and acoustic emission of aluminum-magnesium alloy under non-isothermal thermo-mechanical loading / Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures AIP Conf. Proc. 2015. 1683, 020139-1–020139- 5.

16. Fenenko K.A. The determination of the information frequencies in the frame of the acoustic emission signals from the friction zone of tribosystems / Problems of Tribology, V. 25, No 3/97-2020, 6-13. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-97-3-6-13>

17. Войтов В. А., Фененко К. А., Войтов А.В. Методика діагностування різних конструкцій трибосистем методом акустичної емісії / Проблеми тертя та зношування. 2021. – №. 2 (91). – С. 18-26. DOI: 10.18372/0370-2197.2(91).15526.

Стаття надійшла до редакції 1.09.2021.

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

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

EXPERIMENTAL SUPPORT OF INFORMATIVE FREQUENCIES OF ACOUSTIC EMISIS TRIBOSYSTEMS WITH CHANGE DESIGN, TECHNOLOGICAL AND OPERATING FACTORS

In the presented work experimental dependences which confirmed adequacy of the developed mathematical models of formation of acoustic radiation (AE) from a zone of friction of tribosystems taking into account design, technological and operational factors are received. According to the results of research, a rating of factors influencing the formation of the values of the informative frequencies of AE and the limits of the range of their radiation.

In the first place, according to the degree of impact, there are operational factors - sliding speed and load. The values of the coefficient of variation when changing these factors have the maximum value and are equal to 69,0%. Information frequencies are in the band 110-600 kHz. In second place, according to the degree of influence, is a constructive factor - the size of the area of friction. The value of the coefficient of variation when this factor changes is equal to 65,7%. Information frequencies are in the band 120-580 kHz. In third place, according to the degree of influence, are technological factors - the roughness of the friction surfaces, Ra and Sm . The value of the coefficient of variation when Ra changes is equal to 62,5%, when changing Sm – 50,0%. Information frequencies are in the band 120-650 kHz. In fourth place, according to the degree of impact, are the materials of triboelements and tribological properties of lubricants, which are related to design factors. The value of the coefficient of variation when changing the bonded materials in the tribosystem is 33,3%, when changing the tribological properties of the lubricant – 15,8%. Information frequencies are in the band 210-420 kHz.

Analysis of the obtained dependences confirms the theoretical conclusion that the choice of informative frequencies of acoustic emission signals taking into account design, technological and operational factors will increase the robustness and informativeness of the AE method in the diagnostic process. This analysis can be the basis for the development of methods for diagnosing tribosystems during their operation.

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

References

1. Pushkar Deshpande, Vigneashwara Pandiyan, Bastian Meylan, Kilian Wasmer. Acoustic emission and machine learning based classification of wear generated using a pin-on-disc tribometer equipped with a digital holographic microscope / *Wear*, 2021, vol. 476, p. 612-618. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203622>.
2. Yibo Fan, Fengshou Gu, Andrew Ball. Modelling acoustic emissions generated by sliding friction / *Wear*, 2010, vol. 268, p. 811-815. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.12.010>.
3. Zhe Geng, Debashis Pahan, Tom Reddyhoff. Using acoustic emission to characterize friction and wear in dry sliding steel contacts / *Tribology International*, 2019, vol. 134, p. 394-497. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.014>.
4. Kassahun Asamene, Mannur Sundaresan. Analysis of experimentally generated friction related acoustic emission signals / *Wear*, 2012, vol. 296, p. 607-618. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.07.019>.
5. Hiroo Taura, Kazuki Nakayama. Behavior of acoustic emissions at the onset of sliding friction / *Tribology International*, 2018, vol. 123, p. 155-160. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.025>.
6. Baranov A.V., Vagner V.A., Barsukov G.V. Diagnostika raboty par treniya / *Polzunovskiy vestnik*, 2005, №2(ch.2), s. 149-152.
7. Kolubayev Ye.A., Rubtsov V.Ye., Kolubayev A.V. Osobnosti izlucheniya akusticheskogo signala pri sukhom trenii skol'zheniya / *Obrabotka metallov. Issledovaniya po FTSP*, 2013, №1(58), s.69-74.

-
8. Vinogradov A., Lazarev A., Linderov M., Weidner A., Biermann H. Kinetics of deformation processes in high-alloyed cast transformation-induced plasticity/twinning-induced plasticity steels determined by acoustic emission and scanning electron microscopy: Influence of austenite stability on deformation mechanisms / *Acta Materialia*, 2013, Vol. 61, №7. P. 2434-2449.
 9. Linderov M., Segel C., Weidner A., Biermann H., Vinogradov A. Deformation mechanisms in austenitic TRIP/TWIP steels at room and elevated temperature investigated by acoustic emission and scanning electron microscopy / *Materials Science and Engineering: A*. 2014, Vol. 597. P. 183-193.
 10. Müller A., Segel C., Linderov M., Vinogradov A., Weidner A., Biermann H. The Portevin-Le Châtelier effect in a metastable austenitic stain-less steel / *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016. Vol. 47. №1. P. 59-74.
 11. Makarov, S.V., Plotnikov V.A., Kolubayev Ye.A. Deformatsionnoye povedeniye alyuminiyevo-magniyevogo splava v usloviyakh termomekhanicheskogo nagruzheniya / *Izvestiya AltGU*. – 2015. – № 2. – S. 36–39.
 12. Makarov, S.V., Plotnikov V.A., Lysikov M.V. i dr. Nakopleniye deformatsii i akusticheskaya emissiya v usloviyakh termomekhanicheskogo nagruzheniya alyuminiyevo-magniyevogo splava / *Izvestiya AltGU*. 2015, № 2. S. 40–44.
 13. Makarov, S.V., Plotnikov V.A., Lysikov M.V. et al. Acoustic emission and effect of stepwise deformation in aluminum-magnesium alloy / *Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures AIP Conf. Proc.* 2015. 1683, 020138-1–020138-5.
 14. Makarov, S.V., Plotnikov V.A., Kolubayev Ye.A. Zakonomernosti akusticheskoy emissii v usloviyakh plasticheskoy deformatsii alyuminiyevo-magniyevogo splava pri neizotermicheskom nagruzhenii / *Izvestiya AltGU*. 2014. № 1. S. 252–256.
 15. Makarov, S.V., Lysikov M.V., Kolubaev E.A. et al. The deformation and acoustic emission of aluminum-magnesium alloy under non-isothermal thermo-mechanical loading / *Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures AIP Conf. Proc.* 2015. 1683, 020139-1–020139- 5.
 16. Fenenko K.A. The determination of the information frequencies in the frame of the acoustic emission signals from the friction zone of tribosystems / *Problems of Tribology*, V. 25, No 3/97-2020, 6-13. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-97-3-6-13>.
 17. Vojtov V. A., Fenenko K. A., Voitov A.V. Metodyka diahnostuvannya riznykh konstruktsiy trybosystem metodom akustychnoyi emisii // *Problemy tertya ta znoshuvannya*. 2021. – № 2 (91). – S. 18-26. DOI: 10.18372/0370-2197.2(91).15526.