

Зазначимо, що із збільшенням абсолютних значень J_2 період коливань зменшується, а амплітуда зростає.

Висновки і пропозиції. Таким чином, можна зробити висновок: для вигинів, сумірних із товщиною панелі, значення складових власного магнітного поля великі і мають суттєвий вплив на пружно-деформований стан панелі. Цей факт необхідно враховувати у сучасних технологіях під час створення конструкційних матеріалів, технічних пристроїв, де виявляються ефекти взаємодії механічних і електромагнітних полів.

Список використаних джерел

1. Амбарцумян С. А. Магнитоупругость тонких оболочек и пластин / С. А. Амбарцумян, Г. Е. Багдасарян, М. В. Белубекян. – М. : Наука, 1977. – 272 с.
2. Балюнов О. О. Один з підходів до розв'язку нелінійної задачі про рух довгої прямокутної пластинки в нестационарному магнітному полі / О. О. Балюнов // Вісник Київського університету. – 1989. – Вип. 31. – С. 3-6.
3. Беллман Р. Квазилинеаризация и нелинейные краевые задачи / Р. Беллман, Р. Калаба. – М. : Мир, 1968. – 184 с.
4. Годунов С. К. О численном решении краевых задач для систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений / С. К. Годунов // Успехи математических наук. – 1964. – Т. 16, вып. 3(99). – С. 171-174.
5. Григоренко Я. М. Решение нелинейных задач теории оболочек на ЭВМ / Я. М. Григоренко, А. П. Мукоед. – К. : Вища школа, 1984. – 286 с.
6. Мольченко Л. В. Магнитоупругость нелинейных токнесущих оболочек / Л. В. Мольченко // Новое в науке и технике. Магнитоупругость нелинейных токнесущих оболочек и газодинамика струйных течений. – К. : Вища школа, 1989. – Вип. 8. – С. 3-60.
7. Мольченко Л. В. Математические основы магнитоупругости теории оболочек / Л. В. Мольченко. – К., 1988. – 48 с. – (препринт/АН УССР. Институт математики: 88.47).
8. Мольченко Л. В. Численное решение нелинейной задачи о движении длинной прямоугольной пластинки в переменном магнитном поле / Л. В. Мольченко, О. О. Балюнов // Вычислительная и прикладная математика. – 1990. – Вип. 72. – С. 43-49.
9. Улітко А. Ф. Магнітопружність при динамічному навантаженні / А. Ф. Улітко, Л. В. Мольченко, В. Ф. Ковальчук. – К., 1994. – 155 с.

УДК 620.179:534.6

О.П. Космач, канд. техн. наук

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

КЛАСТЕРНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПІД ЧАС ТЕРТЯ ПОВЕРХОНЬ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

А.П. Космач, канд. техн. наук

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ТРЕНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Oleksandr Kosmach, PhD in Technical Sciences

Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

CLUSTER ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS PARAMETERS IN FRICTION OF COMPOSITE MATERIALS SURFACES

Представлено результати статистичного аналізу амплітудних та енергетичних параметрів результуючих сигналів акустичної емісії, які формуються під час тертя поверхонь із композиційних матеріалів в умовах зміни швидкості обертання пари тертя, а також величини прикладеного навантаження до поверхонь фрикційного контакту. Показано, що кластерний аналіз дозволяє виявити групи параметрів (кластерів) результуючих сигналів акустичної емісії, які відповідають їх різній інформативності до процесів, що виникають у процесі тертя поверхонь із компо-

зиційних матеріалів. Показано, що амплітудні параметри сигналу акустичної емісії мають суттєву відмінність в інформативності серед всіх проаналізованих амплітудно-енергетичних параметрів сигналів акустичної емісії.

Ключові слова: акустична емісія, дисперсія, енергія, композиційний матеріал, тертя, кластер, параметр.

Представлены результаты статистического анализа амплитудных и энергетических параметров результирующих сигналов акустической эмиссии, которые формируются при трении поверхностей из композиционных материалов в условиях изменения скорости вращения пары трения и величины приложенной нагрузки к поверхностям фрикционного контакта. Показано, что кластерный анализ позволяет определить группы параметров (кластеров) результирующих сигналов акустической эмиссии, которые соответствуют их различной информативности к процессам, которые возникают при трении поверхностей из композиционных материалов. Показано, что амплитудные параметры сигнала акустической эмиссии имеют существенное отличие в информативности среди всех проанализированных амплитудно-энергетических параметров сигналов акустической эмиссии.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, дисперсия, энергия, композиционный материал, трение, кластер, параметр.

The results of statistical analysis of amplitude and energy parameters of resultant acoustic emission signals that are formed in friction surfaces of composite materials at change of rotation speed of friction pair and applied load to the surface frictional contact were presented. It is shown that cluster analysis can identify groups of parameters (clusters) of resultant acoustic emission signals that correspond to informativeness of various processes which were occurred in friction surfaces of composite materials. It is shown that the signal amplitude of acoustic emission have significant differences in informativeness among all analyzed amplitude and energy parameters of acoustic emission signals.

Key words: acoustic emission, variance, energy, composite material, friction, cluster, parameter.

Постановка проблеми. Питанням використання та дослідження композиційних матеріалів (КМ) як виконавчих поверхонь вузлів тертя приділяється підвищена увага в науково-технічній літературі. Основні дослідження направлені як на оптимізацію вибору типів КМ, так і на оптимізацію режимів роботи самого вузла тертя для мінімізації спрацювання його основних елементів. Результати експериментальних досліджень показують, що використання КМ як основних поверхонь вузлів тертя дозволяє поліпшити трибологічні характеристики фрикційного контакту та суттєво підвищити термін експлуатації від декількох до десятків разів. Однак при цьому є проблема контролю та діагностики стану таких вузлів тертя, що обумовлено як специфікою будови, так і особливостями процесів зношування та руйнування мікрооб'єктів КМ. Результати багатьох експериментальних досліджень показують, що використання традиційних методів контролю, в основі яких лежить визначення миттєвого зростання моменту тертя, сили тертя, коефіцієнта тертя, дозволяє виявляти розвиток макропроцесів зношування та руйнування поверхневих шарів матеріалів фрикційного контакту. Використання таких методів контролю передбачає фіксацію прискореного переходу зі стадії нормального до стадії катастрофічного зношування, коли настає повна втрата працездатності вузла тертя. Врахування цих обставин можливе лише при фіксації мікропроцесів, які є поштовхом для розвитку процесів зношування поверхневих шарів фрикційного контакту і є початковими етапами зародження необоротного руйнування шарів КМ.

За останні роки у ході дослідження процесів тертя та зношування поверхонь фрикційного контакту з традиційних матеріалів (з кристалічною структурою) та КМ використовуються нетрадиційні методи, які мають високу чутливість до мікропроцесів, що розвиваються. До одного з таких прогресивних методів відноситься метод акустичної емісії (АЕ). Експериментальні дослідження показують, що формовані сигнали АЕ є миттєвим відображенням кінетики процесів, які розвиваються на субмікро-, мікро- та макрорівнях. Послідовний акселераційний розвиток таких процесів приводить до видозміни акустичного випромінювання та його основних параметрів. Тому виникає необхідність врахування таких особливостей під час розроблення методів контролю та діагностики стану вузлів тертя, включаючи і вузли тертя з робочими поверхнями з КМ. Слід зазначити, що мала інерційність та висока чутливість методу АЕ потребує встановлення стійких достовірних зв'язків між параметрами акустичного випромінювання та характеристиками процесів, які розвиваються. Розв'язання цієї проблеми повинно ґрунтуватися як на теоретичних, так і експериментальних дослідженнях. Такі дослідження дозволяють визначати закономірності основних параметрів акустичного випромінювання при дії різних факторів. Визначені подібні закономірності є основою під час роз-

роблення методів контролю та діагностики вузлів тертя з КМ. Експлуатаційні показники вузла тертя є одними з головних показників, які суттєво впливають на процеси тертя та зношування, а отже і на АЕ. До таких показників відносять навантаження, яке виникає на поверхнях фрикційного контакту, а також швидкість обертання пари тертя, яка характеризує динаміку процесу тертя, а також швидкість зміни елементарних площадок контактної взаємодії. Дослідження зміни основних параметрів акустичного випромінювання, а також визначення найбільш інформативних параметрів формованих сигналів АЕ при окремій та одночасній зміні даних експлуатаційних показників вузла тертя із КМ, безумовно, становить як науковий, так і практичний інтерес.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні та експериментальні дослідження сигналів АЕ під час тертя поверхонь фрикційних матеріалів розглянуті в роботах [1–3]. Вони стосуються матеріалів з різною структурою. Модель результуючого сигналу АЕ, який формується у процесі тертя поверхонь для матеріалів з традиційною структурою, розглянута в роботі [4], а для КМ – у роботі [5]. Розроблені моделі ґрунтовані на закономірностях руйнування поверхневих шарів матеріалів з врахуванням кінетики самого процесу руйнування, а також швидкості його зростання в часі. Відмінність у моделях полягає у врахуванні специфіки самого процесу руйнування мікроелементів КМ. У першому випадку розглядається руйнування вторинних структур I та II типу, а у другому випадку модель ґрунтується на концепції FBM (fibre bundle model), а також кінетичних закономірностях руйнування елементів КМ [6; 7], коли руйнування поверхневого шару КМ розглядається як процес послідовного руйнування її мікроскопічних виступів у площадках контактної взаємодії випробувальних зразків. Аналітичний вираз, який описує результуючий сигнал АЕ, що формується під час руйнування поверхонь фрикційного контакту із КМ [8; 9], має вигляд

$$U_p(t) = \sum_j U_j(t_j), \quad (1)$$

де j – порядковий номер j -ої зруйнованої площадки контактної взаємодії; U_j – j -ий імпульсний сигнал АЕ, який формується на j -ій площадці контактної взаємодії поверхонь (рис. 1).

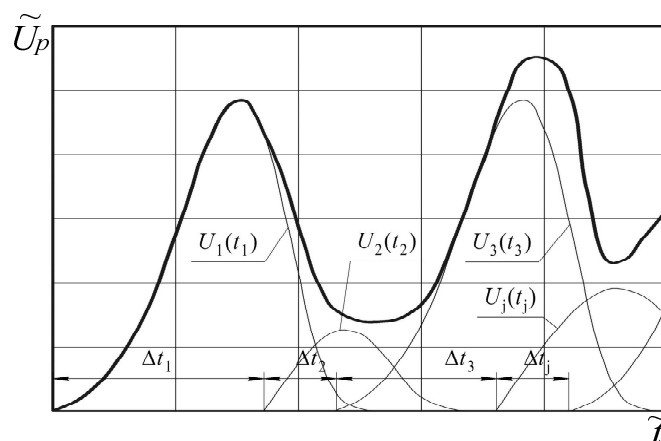


Рис. 1. Результуючий сигнал акустичної емісії в часі, згідно з (1) у відносних одиницях, який формується під час тертя поверхонь із композиційних матеріалів

Результати експериментальних досліджень показують складний характер зміни параметрів реєстрованих сигналів АЕ на різних стадіях розвитку процесу тертя та зношування. Така видозміна акустичного випромінювання свідчить про малу інерційність методу, а також його високу чутливість до мікропроцесів, які розвиваються в поверхневих шарах КМ. Однак інтерпретація цих процесів є достатньо складним завданням, що обумовлено складністю теоретичних досліджень, а також складністю експерименталь-

них випробувань. Ця проблема, безумовно, не дозволяє повною мірою реалізувати можливості методу АЕ в контролі та діагностиці вузлів тертя з інтерпретацією процесів, які розвиваються в поверхневих шарах КМ.

Проведені експериментальні дослідження [10; 11] показали, що у процесі тертя поверхонь з КМ формуються безперервні сигнали АЕ, які мають сильно порізану форму. При цьому було показано, що експлуатаційні показники вузла тертя впливають на параметри формованого сигналу АЕ. При зростанні швидкості обертання пари тертя спостерігається зростання середнього рівня амплітуди та енергії результуючого сигналу АЕ, а також величини їх розкиду на заданому інтервалі дослідження. При зростанні контактного навантаження на поверхнях тертя також спостерігається зростання середнього рівня амплітуди та енергії результуючого сигналу АЕ, а також величини її розкиду. Проте приріст значень параметрів формованого сигналу АЕ для даного виду навантаження значно менший.

Аналізовані параметри сигналу АЕ, такі як середній рівень амплітуди, усередненої та сумарної енергії результуючого сигналу АЕ, величини їх дисперсій та стандартних відхилень, безумовно, можуть використовуватися як інформативні параметри. Проте з метою уточнення параметрів формованих сигналів АЕ, а також обмеження кількості використовуваних параметрів виникає необхідність виявлення групи амплітудно-енергетичних параметрів, яка має стійкі достовірні зв'язки з процесами тертя та зношування поверхонь фрикційного контакту. З цією метою використовуються різноманітні статистичні методи дослідження формованого результуючого сигналу, зокрема кластерний аналіз.

Термін кластерний аналіз включає в себе набір багатьох алгоритмів класифікації, які дозволяють розподілити досліджувані об'єкти за кластерами. Основною перевагою цього аналізу полягає в наочній організації структури даних спостереження. Слід зазначити, що кластерний аналіз визначає найбільш можливо значиме рішення. Тому перевірка статистичної значимості в цьому разі не завжди можлива, навіть у випадках, коли відомі p – рівні.

Основний алгоритм кластерного аналізу полягає в об'єднанні об'єктів у досить великі кластери, використовуючи при цьому деяку міру подібності або відстань між об'єктами. Типовим результатом такої кластеризації є ієрархічне дерево. Метод „деревоподібної кластеризації” використовується у процесі формування кластерів незбіжності або відстані між об'єктами. Найбільш прямий шлях обчислення відстаней між об'єктами в багатовимірному просторі полягає в обчисленні евклідових відстаней або його значення в квадраті, відстані міських кварталів, відстані Чебишева, степеневій відстані, а також відсотка незгоди.

При об'єднанні двох кластерів між собою можливі деякі різні варіанти опрацювання. Найбільш розповсюджений варіант можливий, коли два будь-які об'єкти у двох кластерах ближчі один до одного, ніж відповідна відстань зв'язку. Цей метод отримав назву “правило найближчого сусіда” або метод “одиначного зв'язку”. Це правило будує “волокнисті кластери”, тобто елементи, які опинилися ближче інших один до одного. Як альтернативу можуть використовуватися сусіди у кластерах, які знаходяться далі всіх інших пар об'єктів один від одного. Цей метод називається метод “повного зв'язку”. Повний зв'язок (метод “найбільш віддалених сусідів”) дозволяє визначити відстані між кластерами з найбільшою відстанню між будь-якими двома об'єктами в різних кластерах. Метод “незваженого попарного середнього” дозволяє обчислити відстань між двома різними кластерами як середня відстань між усіма парами об'єктів в них. Метод “виваженого попарного середнього” ідентичний методу “незваженого попарного середнього”, за винятком того, що при обчисленнях розмір відповідних кластерів, тобто число об'єктів, що містяться в них, використовується як ваговий коефіці-

ент. “Незважаючи центроїдний” метод дозволяє визначити відстань між двома кластерами як відстань між їх центрами ваги. “Зважений центроїдний” метод (медіана) є ідентичним попередньому, за винятком того, що під час обчислень використовуються ваги для обліку різниці між розмірами кластерів. Використання цих методів дозволяє всебічно проаналізувати найбільш розповсюджені амплітудні та енергетичні параметри сигналів АЕ, які формуються у процесі тертя поверхонь із КМ. Це дозволяє визначити найбільш інформативні та неінформативні групи параметрів, які відповідають процесам, що протікають при зміні експлуатаційних режимів пари тертя з КМ, зокрема при зміні швидкості її обертання та навантаження поверхонь фрикційного контакту.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. З метою уточнення інформативних параметрів формованих сигналів АЕ, а також обмеження кількості використовуваних параметрів під час дослідження процесів тертя із КМ виникає необхідність виявлення груп амплітудно-енергетичних параметрів, які мають достовірні зв'язки з процесами тертя та зношування поверхонь фрикційного контакту із КМ. Використання кластерного аналізу, а також його основних методів дозволяє об'єднати параметри результуючих сигналів АЕ за такими ознаками, як найбільша віддаленість параметрів один від одного, найбільша близькість, усереднена відстань, тобто дозволяє оцінити параметри результуючих сигналів АЕ з погляду інформативності до процесів, які виникають під час тертя поверхонь із КМ в умовах зміни експлуатаційних режимів навантаження пари тертя.

Мета статті. У роботі буде проведено кластерний аналіз амплітудно-енергетичних параметрів результуючих сигналів АЕ, які формуються у процесі тертя поверхонь із КМ, з урахуванням одночасної зміни величини прикладеного навантаження та швидкості обертання пари тертя. Буде показано, що кластерний аналіз дозволяє виявити групи параметрів (кластерів) результуючих сигналів АЕ, які відповідають їх різній інформативності до процесів, що виникають під час тертя поверхонь із композиційних матеріалів. Буде показано, що амплітудні параметри сигналу АЕ мають суттєву відмінність в інформативності серед всіх проаналізованих амплітудно-енергетичних параметрів сигналів АЕ.

Виклад основного матеріалу. Результати теоретичних та експериментальних досліджень [10; 11] показують, що при зміні швидкості обертання пари тертя із КМ та величини прикладеного навантаження відбувається зміна еквівалентних напружень, а також взаємопов'язаних механічних параметрів, таких як момент обертання, момент тертя, сила тертя тощо. Така зміна механічних параметрів вузла тертя із КМ, безумовно, призводить і до зміни амплітудних та енергетичних параметрів формованих сигналів АЕ. Як досліджувані зразки використовувалися деталі типу втулка з алюмінієвого сплаву Д16 та легованої сталі 30ХГСА з робочими торцевими поверхнями, на яких було нанесено покриття на основі твердого сплаву ВК6. Дослідження АЕ випромінювання проводилося на стадії нормального зношування вузла тертя після закінчення стадії припрацювання. Випробування зразків здійснювалося з використанням конструктивної схеми взаємодії "диск-диск" на модернізованій випробувальній машині СМТ-1 з комп'ютеризованим управлінням. Відповідно до схеми випробування один із зразків (Д16 з покриттям ВК6) протягом експериментів залишався нерухомим, а інший зразок зі сталі 30ХГСА з покриттям ВК6 обертася із заданою швидкістю. Комп'ютеризоване управління забезпечувало як необхідну сталу швидкість обертання рухомого зразка, так і необхідне навантаження на нерухомий зразок. Швидкість обертання рухомого зразка протягом усіх випробувань змінювалася в межах $500 \dots 800 \text{ хв}^{-1}$ з приростом 100 хв^{-1} , при цьому експлуатаційне навантаження P змінювалось у діапазоні значень від $300 \dots 750 \text{ Н}$ з приростом 150 Н . Під час проведення експериментів як змащувальне середовище використовувалося масло типу М10Г2К, витрати якого становили $1,2 \text{ л/год}$.

Для реєстрації сигналів АЕ, які формуються у процесі тертя поверхонь випробовуваних зразків, використовувався датчик АЕ, який встановлювався на нерухомому зразку. Перед встановленням поверхня датчика змащувалася акусто-прозорою речовиною. З виходу датчика результуючі сигнали АЕ надходили в підсилувальний тракт, а потім у мобільний акусто-емісійний діагностичний комплекс, в якому проводилось їх подальше оброблення з формуванням і збереженням необхідних масивів даних. Як основні оброблювані параметри результуючих сигналів АЕ використовувалися: середній рівень амплітуди U , усередненої енергії E_U , сумарної енергії E_S ; стандартне відхилення амплітуди σ_U , усередненої енергії σ_{E_U} , сумарної енергії σ_{E_S} ; дисперсія амплітуди D_U , усередненої енергії D_{E_U} , сумарної енергії D_{E_S} . Результати оброблення можуть виводитися на екран монітора у вигляді графічних залежностей, а також перетворюватися у формати даних для математичних додатків під Windows.

Загальний алгоритм кластерного аналізу параметрів сигналів АЕ, які формуються під час тертя поверхонь із КМ, показано на рис. 2. Для проведення кластерного аналізу параметрів сигналів АЕ необхідно створення масиву даних, який включає показники навантаження пари тертя, зокрема швидкості обертання пари тертя та величини прикладеного навантаження, а також аналізовані амплітудні та енергетичні параметри сигналів АЕ. Стадія безпосереднього кластерного аналізу включає в себе вибір мір відстаней, вибір методів кластеризації, а також прийняття кількості кластерів, які підлягають виявленню. Завершальним етапом кластерного аналізу є оцінювання достовірності процесу кластеризації, тобто оцінювання відмінності кластерів між собою, яка була визначена за F -критерієм.

Всі досліджувані сигнали АЕ, які формуються при зміні експлуатаційних показників пари тертя із КМ, мають подібну порізану форму і відрізняються лише величинами середнього рівня та величиною розкиду. Формовані результуючі сигнали АЕ, показані на рис. 3, отримані для часу усереднення $t_u=15$ мс. Вибір значення часу усереднення t_u обумовлений необхідністю мінімізації втрат від вкладу складових процесів у результуючий сигнал АЕ [12; 13].

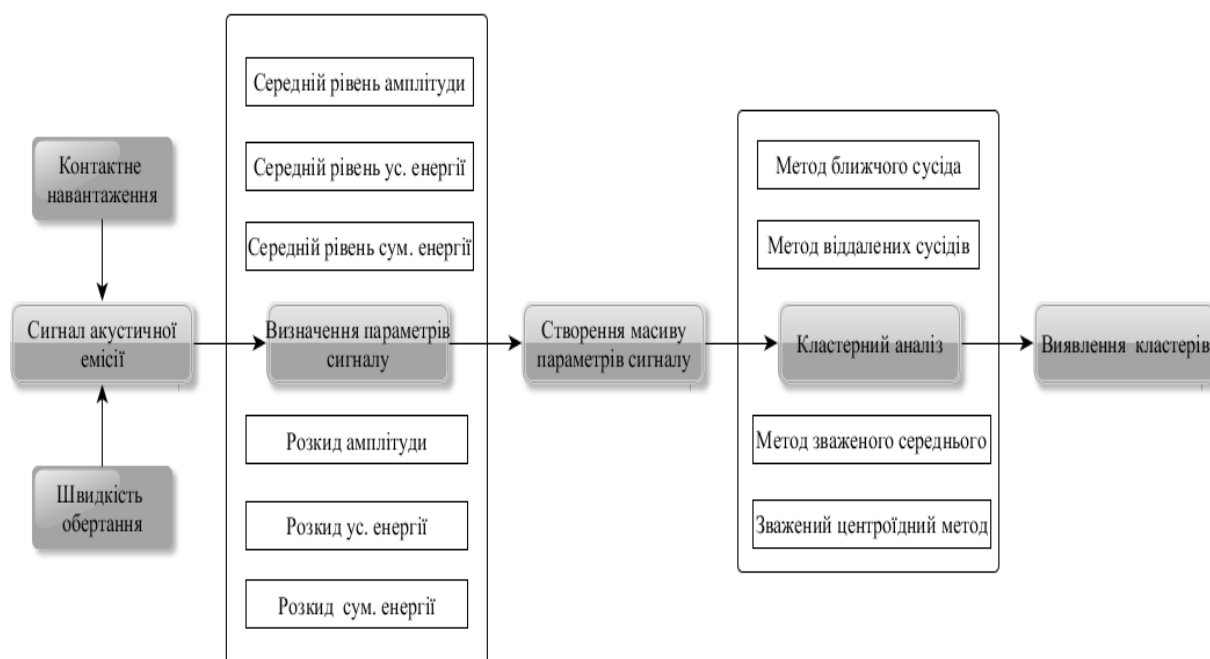


Рис. 2. Алгоритм кластерного аналізу основних параметрів формованих сигналів акустичної емісії у процесі випробування зразків із композиційних матеріалів

Проведені експериментальні дослідження показали, що результуючі сигнали АЕ, які зареєстровані при заданих значеннях навантаження та швидкості обертання пари тертя, являють собою безперервні сигнали з деякими середніми рівнями амплітуд, усереднених і сумарних енергій, а також величинами їх розкиду (рис. 3).

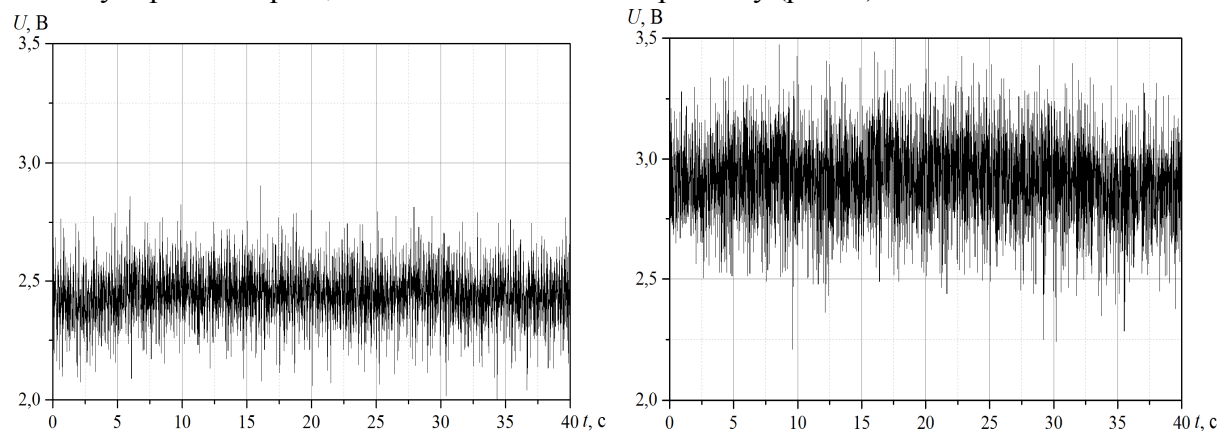


Рис. 3. Графіки зміни амплітуди результуючих сигналів акустичної емісії в часі, які зареєстровано під час випробувань на зношування пари тертя з покриттями із композиційних матеріалів марки ВК6 при різних значеннях прикладеного навантаження. Значення навантаження P : а – 300 Н; б – 750 Н. Час усереднення $t_u = 15$ мс

На рис. 4 показано дендрограму об’єднання амплітудних та енергетичних параметрів формованих сигналів АЕ, яку було отримано з використанням методу “найближчого сусіда”. З рис. 4 видно, що в результаті аналізу отримано два кластера, один з яких включає в себе E_U, E_S, σ_{E_S} , а другий кластер включає в себе D_{E_U}, D_{E_S} .

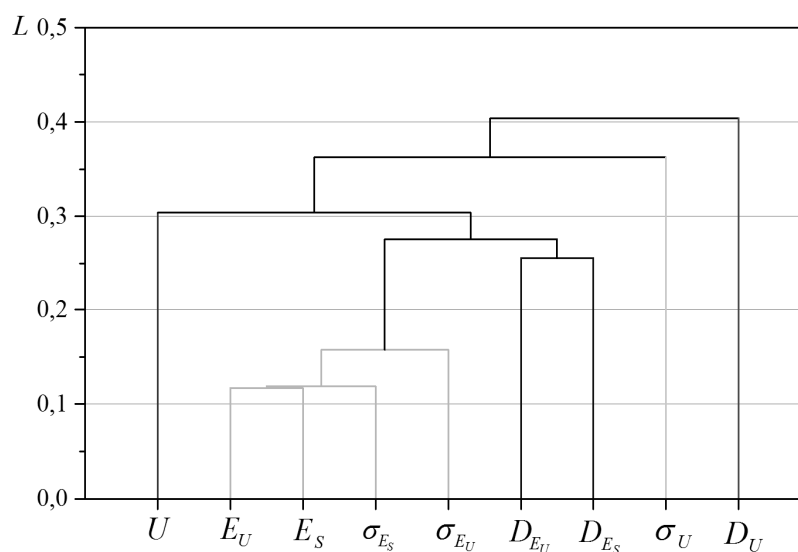


Рис. 4. Дендограма об’єднання амплітудно-енергетичних параметрів результуючого сигналу акустичної емісії, який формується під час тертя поверхонь із композиційного матеріалу згідно з методом “найближчого сусіда”

На першому кроці кластеризації відбувається об’єднання середнього рівня усередненої енергії E_U та сумарної E_S енергій результуючого сигналу АЕ, що добре узгоджується з фізичними уявленнями про процеси формування сигналу. На наступному кроці до цієї групи приєднується стандартне відхилення сумарної енергії σ_{E_S} сигналу АЕ. Метод “найближчого сусіда” дозволяє зробити висновок, що серед проаналізованих амплітудних та енергетичних параметрів сигналів АЕ, які виникають під час тертя поверхонь із КМ, формуються дві стійкі групи енергетичних параметрів (кластерів), які відповідають середньому рівню, а також величині розкиду, що характеризуються дисперсією.

З рис. 4 видно, що амплітудні параметри сигналу АЕ не утворюють жодних стійких груп, що свідчить про суттєву відмінність в інформативності цього параметра сигналу АЕ від проаналізованих енергетичних параметрів сигналу АЕ.

На рис. 5 показано дендрограму об'єднання амплітудних та енергетичних параметрів формованих сигналів АЕ, яку було отримано з використанням методу “віддалених сусідів”. З рис. 5 видно, що в результаті аналізу отримано три кластера, один з яких включає в себе U , E_U , E_S , другий кластер включає в себе σ_{E_S} , σ_{E_U} , D_{E_U} , D_{E_S} і третій кластер, який включає в себе σ_U , D_U . На першому кроці кластеризації відбувається об'єднання стандартних відхилень сумарної σ_{E_S} та усередненої σ_{E_U} енергій результуючих сигналів АЕ. На наступних кроках до цієї групи приєднуються дисперсії усередненої D_{E_U} та сумарної D_{E_S} енергій формованого результуючого сигналу АЕ. В подальшому відбувається об'єднання стандартного відхилення амплітуди σ_U та дисперсії амплітуди D_U результуючого сигналу АЕ. Після цього відбувається об'єднання середніх рівнів амплітуди U , усередненої E_U та сумарної E_S енергій формованого результуючого сигналу АЕ.

З рис. 5 видно, що параметри результуючого сигналу АЕ утворюють три стійких найвіддаленіших між собою групи, які характеризують середній рівень результуючого сигналу АЕ, величину розкиду енергетичних параметрів результуючого сигналу АЕ, а також величину розкиду амплітуди результуючого сигналу АЕ. Результати досліджень, які проведено раніше, а також використання методу “віддалених сусідів” дозволяють зробити висновок про те, що є суттєва відмінність в інформативності параметрів, які характеризують середній рівень амплітудних та енергетичних параметрів сигналів АЕ, а також параметрів, які характеризують величину розкиду енергетичних параметрів результуючих сигналів АЕ. Отримані результати добре узгоджуються з результатами експериментальних досліджень результуючих сигналів АЕ, які було отримано в [12; 13].

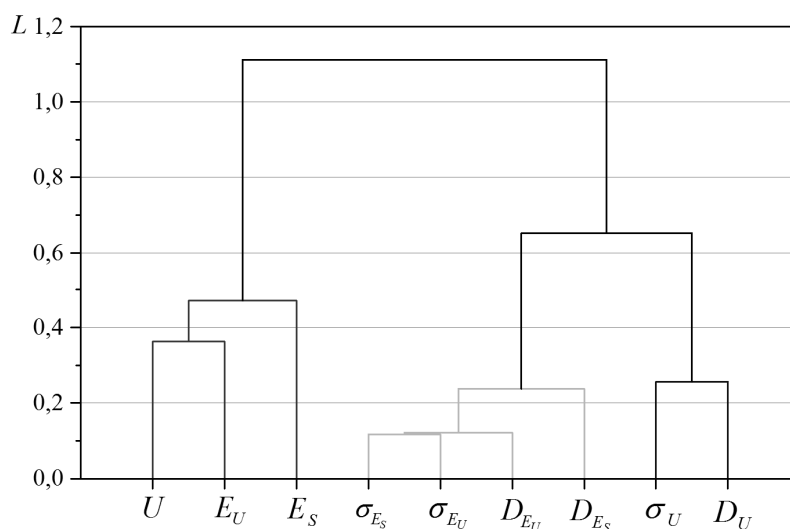


Рис. 5. Дендограма об'єднання амплітудно-енергетичних параметрів результуючого сигналу акустичної емісії, який формується під час тертя поверхонь із композиційного матеріалу згідно з методом “віддалених сусідів”

Використані методи “найближчого сусіда” та “віддалених сусідів” дозволяють зробити висновок про те, що серед проаналізованих амплітудних та енергетичних параметрів сигналів АЕ, які формуються під час тертя поверхонь із КМ, найбільшу інформативність мають енергетичні параметри формованих результуючих сигналів АЕ, зокрема дисперсії усередненої та сумарної енергій результуючих сигналів АЕ. Найменш інформативним параметром формованого сигналу АЕ виступають амплітудні параметри, зокрема середній рівень амплітуди результуючого сигналу АЕ.

Аналогічні результати було отримано при використанні “медіанного” методу. Серед проаналізованих амплітудних та енергетичних параметрів сигналів АЕ утворюються дві стійких групи, які характеризують середній рівень усередненої та сумарної енергій результуючого сигналу АЕ, а також величину розкиду енергетичних параметрів результуючого сигналу АЕ, що підтверджує різну інформативність цих параметрів результуючих сигналів АЕ. Як і при попередніх дослідженнях, амплітудні параметри не входять до груп енергетичних параметрів, що підтверджує їх низьку інформативність до процесів, які виникають під час тертя поверхонь із КМ.

Перевірка відмінності груп кластерів між собою для всіх використаних методів здійснювалася з використанням дисперсійного аналізу (F -критерію). Рівень значимості для всіх груп кластерів зі ступенем вільності $k=3$ був високий та становив у межах 10...18, тобто всі значення F -критерію значимі. Дисперсійний аналіз показав, що всі групи виявлених кластерів є критеріями інформативності параметрів результуючих сигналів АЕ, які формуються під час тертя поверхонь із КМ.

Результати досліджень показали, що амплітудно-енергетичні параметри результуючого сигналу АЕ можна розділити на групи інформативних та неінформативних параметрів з використанням кластерного аналізу. В свою чергу енергетичні параметри мають найбільшу інформативність серед проаналізованої групи параметрів результуючих сигналів АЕ. При цьому дисперсії усередненої та сумарної енергії результуючого сигналу АЕ мають найбільшу інформативність серед всіх проаналізованих амплітудних та енергетичних параметрів формованих сигналів АЕ. Це означає, що в реальному експерименті при зміні експлуатаційних умов навантаження пари тертя з КМ найбільша зміна значень буде спостерігатись саме в дисперсії усередненої та сумарної енергії формованого результуючого сигналу АЕ. При цьому кластерний аналіз дозволяє суттєво зменшити кількість аналізованих параметрів формованих результуючих сигналів АЕ з 9 початкових до 2 кінцевих, що значно спрощує математичний апарат, який закладається у процесі оброблення формованих результуючих сигналів АЕ.

Висновки і пропозиції. Проведено кластерний аналіз амплітудних та енергетичних параметрів результуючих сигналів АЕ, які формуються під час тертя поверхонь із КМ в умовах зміни експлуатаційних умов навантаження, які характеризуються зміною швидкості обертання пари тертя, а також величини прикладеного навантаження до поверхонь фрикційного контакту. Отримані результати показали, що при кластерному аналізі утворюються групи амплітудних та енергетичних параметрів (кластери) результуючих сигналів АЕ.

Використання методу “найближчого сусіда” дозволяє зробити висновок, що серед проаналізованих амплітудно-енергетичних параметрів сигналів АЕ, які формуються при терті поверхонь із КМ, утворюються дві групи енергетичних параметрів (кластерів), які характеризують середній рівень, а також величину розкиду, що характеризується дисперсією. При цьому амплітудні параметри сигналу АЕ не утворюють жодних груп параметрів, що свідчить про суттєву відмінність в інформативності цього параметра сигналу АЕ від проаналізованих енергетичних параметрів сигналу АЕ. Використання методу “віддалених сусідів” дозволяє зробити висновок про те, що є суттєва відмінність в інформативності параметрів, які характеризують середній рівень амплітудних та енергетичних параметрів сигналів АЕ, а також параметрів, які характеризують величину розкиду енергетичних параметрів результуючих сигналів АЕ. Найбільшу інформативність у цьому випадку мають енергетичні параметри формованих результуючих сигналів АЕ, зокрема дисперсії усередненої та сумарної енергії результуючих сигналів АЕ, а найменшу інформативність мають амплітудні параметри, зокрема середній рівень амплітуди результуючого сигналу АЕ.

Використання кластерного аналізу дозволяє суттєво зменшити кількість аналізованих параметрів результуючих сигналів АЕ, які формуються під час тертя поверхонь із КМ. Для дослідження процесів, які виникають при зміні експлуатаційних режимів навантаження пари тертя із КМ, слід проводити аналіз дисперсії усередненої та сумарної енергій результуючих сигналів АЕ. У зв'язку з усередненням значень енергетичних параметрів результуючих сигналів АЕ найбільшої зміни значень слід очікувати саме в дисперсії сумарної енергії результуючого сигналу АЕ. Проте для аналізу процесів, які виникають у процесі тертя поверхонь із КМ можуть використовуватися і інші параметри формованих сигналів АЕ, наприклад, такі як амплітудно-частотні, потужність та ін.

Перспективним та актуальним напрямком як експериментальних, так і теоретичних дослідження є аналіз енергетичних параметрів результуючого сигналу АЕ, який формується при катастрофічному зношуванні поверхонь фрикційного контакту із КМ, а також дослідження стадій, які відповідають початку зародження процесів підвищеного зношування поверхонь.

Список використаних джерел

1. *Study on stick-slip friction of reciprocating o-ring seals using acoustic emission techniques* / C. Liao; S. Suo, Y. Wang, W. Huang, Y. Liu // *Tribology transactions*. – 2012. – Vol. 55. – № 1. – P. 43-51.
2. *Tribological properties of copper alloy-based composites reinforced with tungsten carbide particles* / E. Hong, B. Kaplin, T. You, M. Suh, Y. S. Kim, H. Choe // *Wear*. – 2011. – Vol. 270. – P. 591-597.
3. *Rubtsov V. E. The use of acoustic emission analysis for the wear in sliding friction* / V. E. Rubtsov, A. V. Kolubaev, V. L. Popov // *Letters to ZHTF*. – 2013. – Vol. 4. – P. 79-86.
4. *Filonenko S. F. Modeling of the acoustic emission signals for the case of material's surface layers distraction in the process of friction* / S. F. Filonenko; A. P. Stahova; T. N. Kositskaya // *Proceedings of the National aviation university*. – 2008. – № 2. – P. 24-28.
5. *Модель сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционного материала под действием поперечной силы* / С. Ф. Филоненко, В. М. Калита, Т. Н. Косицкая, А. П. Космач // *Технологические системы*. – 2010. – № 2. – С. 23-32.
6. *Філоненко С. Ф. Моделювання сигналів акустичної емісії при руйнуванні композиційних матеріалів під дією поперечної сили* / С. Ф. Філоненко, Т. М. Косицька, О. П. Космач // *Вісник Національного авіаційного університету*. – 2010. – № 2. – С. 95-103.
7. *Модель сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционного материала под действием поперечной силы* / С. Ф. Филоненко, В. М. Калита, А. П. Космач, Т. Н. Косицкая // *Технологические системы*. – 2010. – № 2(51). – С. 45-53.
8. *Філоненко С. Ф. Модель сигнала акустичної емісії при терті поверхонь композиційних матеріалів* / С. Ф. Філоненко, Т. М. Косицька, О. П. Космач // *Нукоємні технології*. – 2010. – № 2(6). – С. 30-38.
9. *Filonenko S. Impact of rotational speed of composite friction pair on energy accumulation in acoustic emission signal formation* / S. Filonenko, A. Kosmach. *Aviation*. – 2013. – Vol. 17. – № 4. – P. 129-136.
10. *Филоненко С. Ф. Влияние эксплуатационной нагрузки на акустическую эмиссию при трении композиционных материалов* / С. Ф. Филоненко, А. П. Космач // *Вісник ЧДТУ*. – 2011. – № 4(53). – С. 125-133.
11. *Дослідження кінетики мікроструктурних перетворень контактної зони тертя під впливом мастильного матеріалу* / М. П. Цаплій, О. П. Космач, Ю. В. Велігорська, О. О. Мішук // *Вісник Інженерної академії України*. – 2012. – № 3-4. – С. 140-144.
12. *Филоненко С. Ф. Закономерности изменения энергии сигналов акустической эмиссии при трении поверхностей из композиционных материалов* / С. Ф. Филоненко, Т. М. Косицкая, О. П. Космач // *Вісник Інженерної академії України*. – 2011. – № 1. – С. 155-161.
13. *Филоненко С. Ф. Влияние эксплуатационной нагрузки на акустическую эмиссию при трении композиционных материалов* / С. Ф. Филоненко, А. П. Космач // *Вісник ЧДТУ*. – 2011. – № 4. – С. 125-133.