

# БАГАТОСТУПЕНЕВА ФІЛЬТРАЦІЯ ТА БАГАТОПАРАМЕТРИЧНА КЛАСТЕРИЗАЦІЯ ПОДІЙ АЕ

С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, О.І. Бойчук

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: inpat59@ukr.net

Застосування методу акустико-емісійного контролю та систем технічної діагностики сімейства ЕМА на відповідальних промислових об'єктах дозволило не тільки оперативно отримувати інформацію щодо їх технічного стану, але й на базі отриманих даних удосконалювати методологічні підходи до обробки даних, а також обладнання контролю та його програмне забезпечення. У даній статті представлено результати проведеного аналізу проблеми фільтрації та оптимальних параметрів кластеризації даних АЕ та перевірки ефективності вибраних методів кластеризації на зразках і елементах конструкцій. Бібліогр. 5, рис. 17.

*Ключові слова:* акустична емісія, кластеризація, зміна параметрів, елементи конструкції

**Вступ.** Широке розповсюдження методу акустичної емісії (АЕ) на потенційно небезпечних об'єктах промисловості, зокрема використання систем АЕ контролю типу ЕМА на конструкціях, що працюють при високих температурах, мають високий рівень зашумованості [1] та деякі додаткові складнощі процесів періодичного контролю та безперервного моніторингу, змушують розробників вказаних систем, з урахуванням досвіду експлуатації та рекомендацій персоналу підприємств-користувачів, доопрацьовувати вимірювальне обладнання та програмне забезпечення до нього. У даній роботі представлено деякі вдосконалення, що дозволяють підвищити якість оцінки стану матеріалу контрольованих конструкцій за рахунок багатоступеневої фільтрації даних (апаратної, цифрової та програмної) і багатопараметричної кластеризації вже сформованих подій АЕ.

**Мета досліджень** – короткий опис багатоступеневої фільтрації даних АЕ; визначення оптимального набору параметрів для проведення кластеризації даних, отриманих при проведенні АЕ досліджень матеріалів, для удосконалення оцінювання стану матеріалів конструкцій під час проведення АЕ контролю та моніторингу.

**Обладнання для проведення досліджень.** У роботі використовували випробувальний стенд на базі розривної машини з гідравлічним приводом Р-20, тензометричну станцію для вимірювання параметрів навантаження, систему АЕ діагностики ЕМА-3, зразки матеріалів спеціальної форми [2].

Використання особливих засобів фільтрації даних АЕ та їх багатопараметрична кластеризація є особливо актуальними для об'єктів, що працюють в умовах високих шумів і високих температур. Це, наприклад, об'єкти теплоенергетичного комплексу (рис. 1). Покажемо результати кластеризації даних, отриманих з паропроводів гарячого проміжного перегріву (ГПП).

Коротка технічна характеристика об'єктів АЕ контролю: марка матеріалу – 15Х1МФ; 12Х1МФ; товщина стінки – 25 мм, 18 мм; діаметр зовнішній – 630 мм, 377 мм, 426 мм; робочий тиск – 3,7 МПа; робоча температура – 545 °С; робоче середовище – пара. Труби знаходяться під шаром ізоляції, що потребує спеціальних засобів встановлення давачів АЕ за допомогою хвилеводів.

У процесі попередніх випробувань і дослідної експлуатації у режимі моніторингу були виділені певні ділянки, на яких АЕ активність є підвищеною,

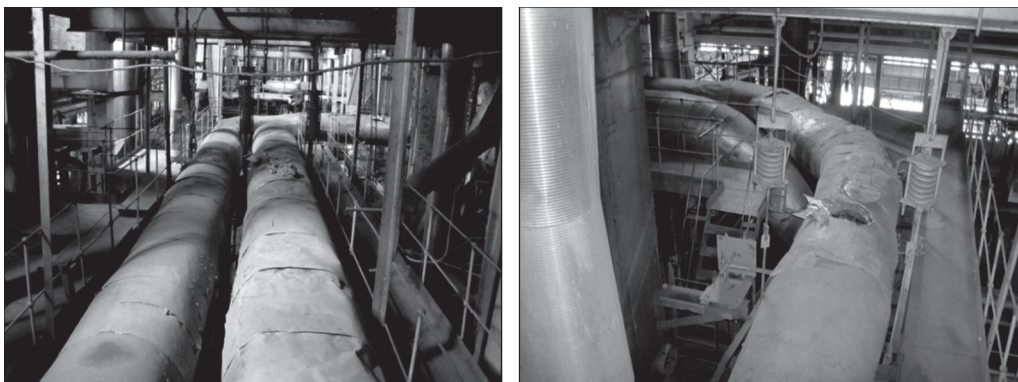


Рис. 1. Окремі ділянки об'єкту АЕ моніторингу ГПП

А.Я. Недосека – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>, С.А. Недосека – <https://orcid.org/0000-0002-3239-381X>, М.А. Яременко – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>, М.А. Овсієнко – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>, О.І. Бойчук – <https://orcid.org/0000-0001-5800-1549>

© С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, О.І. Бойчук, 2023

що потребувало додаткового контролю (рис. 2). Виконаний контроль декількома неруйнівними методами показав, що відзначені ділянки справді є більш пошкодженими, а ті, що позначені рожевим кольором, вимагають оперативного ремонту.

У приладах ЕМА останнього покоління використовується три типи частотної фільтрації вхідних даних – аналоговий на апаратному рівні, цифровий на основі програм першого, проміжного ступеня, які обробляють вхідні дані одразу після надходження на прилад, і програмний, якій виконується програмою ЕМА-3.92 вже щодо тих даних, які не були відфільтровані приладом.

На деяких підприємствах продовжують працювати системи типу ЕМА-3. На приладах цих систем не передбачено використання смугових цифрових фільтрів, тому завданням є коректне використання аналогових і програмних типів фільтрів. Загалом, це завдання виконане для системи моніторингу трубопроводу ГПП.

Для покращення візуального подання даних АЕ моніторингу було створено спеціальний візуальний інтерфейс (рис. 2) для схематичного від-

творення трубопроводів ГПП у програмі ЕМА-3.92. Відповідне вікно дозволяє відображувати кожну з трьох ліній трубопроводів ГПП окремо або разом, вибирати колір відображення труб, датчиків АЕ та їх номерів. На показаній схемі видно кілька напівпрозорих кіл, що відображують кластери – центри АЕ активності. Їх також можна за необхідності приховувати. Колір кластера показує ступінь небезпеки – від зеленого безпечного до жовтого, помаранчевого, небезпечного червоного та особливо небезпечного – чорного (при появі цих кольорів попереджень проводиться екстрений аналіз ситуації, що виникла). Над схемою трубопроводів розташована таблиця прогнозу руйнівного навантаження для кожної з труб. Попередження про небезпеку [3, 4] відбувається згідно з ДСТУ 4227-2003 [5] і залежить від кількості подій АЕ за вибраний проміжок часу.

Особливістю роботи трубопроводів ГПП є великий шумовий фон, що потребує особливих підходів до опрацювання АЕ інформації. На рис. 3 показано вікно програми ЕМА-3.92, що контролює трубопроводи ГПП, з відключеною фільтрацією даних АЕ та кластеризацією лише за координатною ознакою.

Як бачимо, індикатори небезпеки при відсутності фільтрації і при стандартній кластеризації по координатах показують навіть чорний колір (максимальний рівень небезпеки), при цьому справжній стан труб ГПП на даний момент контролю не є небезпечним. Такі приклади можна отримати неодноразово (рис. 4). При цьому шумовий фон також є досить великим. Найбільшого значення він досягає на останньому датчику кожної з труб №№ 1, 2 завдовжки 120 м і на трубі № 3, яка контролюється лише двома датчиками.

Максимальна величина шумового фону може сягати до 50 дБ. При цьому виникають хибні події АЕ, які підраховуються відповідним алгоритмом, видають хибне попередження щодо небезпеки і, відповідно, неточний прогноз руйнівного навантаження. Якщо не вживати заходів щодо коректної фільтрації та умов кластеризації, система моніторингу буде майже весь час показува-

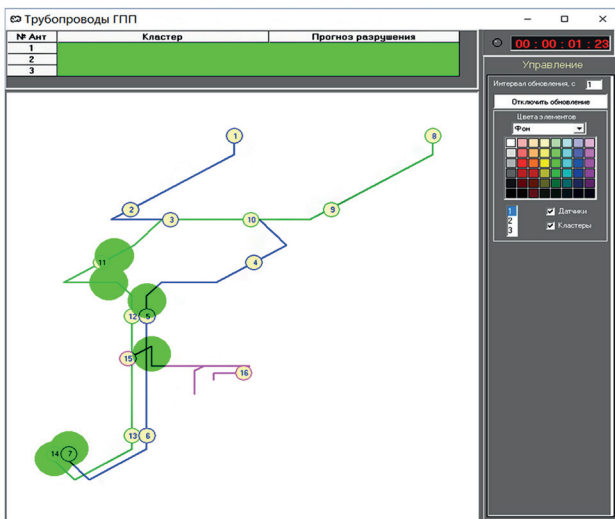


Рис. 2. Спеціальний інтерфейс для відображення ділянок ГПП у програмі АЕ моніторингу

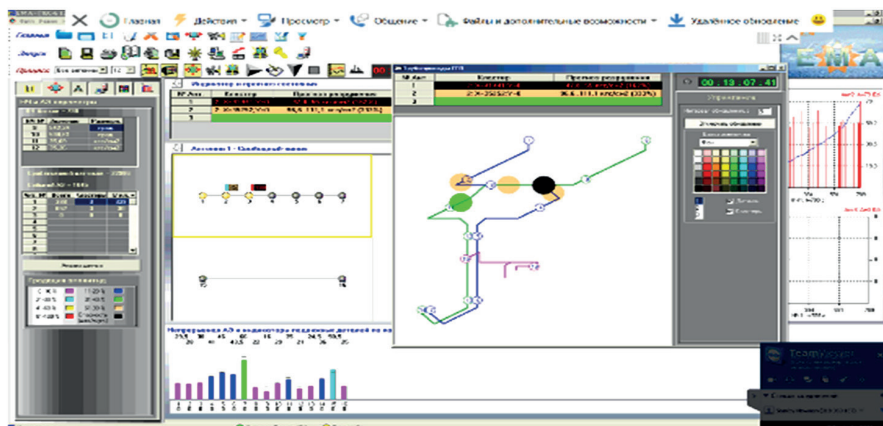


Рис. 3. Вікно програми ЕМА-3.92, що контролює ГПП, з відключеною фільтрацією даних АЕ

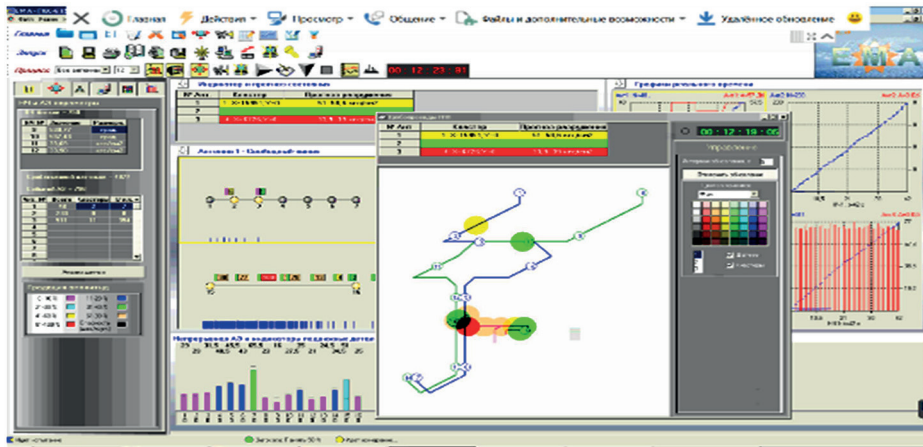


Рис. 4. Приклад вікна програми ЕМА-3.91 з відключеною фільтрацією даних АЕ

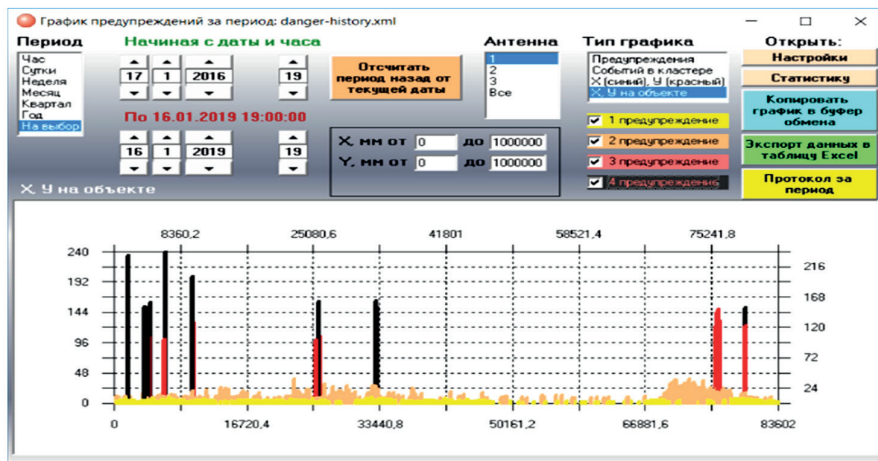


Рис. 5. Вікно статистики для програм типу ЕМА з координатами небезпечних джерел. Кольором показано ступінь небезпеки, висота стовпчика – кількість подій у кластері за заданий період за ДСТУ 4227-2003

ти небезпеку, дезорієнтуючи персонал підприємства. Для систем типу ЕМА створено спеціальні службові програми, зокрема ті, що показують статистику попереджень за певний період часу. На графіках таких програм можна відстежувати не тільки час виникнення та рівень попередження, але й координату джерела АЕ, яке його викликало. Вікно статистики попереджень для ГПП за відсутності фільтрації та коректної кластеризації даних показано на рис. 5.

Звичайно, використання даних без відповідної фільтрації дає похибку у визначенні стану конструкції. На приладах типу ЕМА-3 не передбачені смугові цифрові фільтри, тому їх заміна виконується програмно. Насамперед задається так званий строб, тобто час, який відраховується від початку події АЕ, за який інші дані по каналах, що створили подію, не приймаються.

Надалі задаються параметри фільтрації вхідних та оброблених даних АЕ. Оскільки на приладах типу ЕМА-3 не передбачено наявності смугових цифрових фільтрів, їх завдання виконується програмно. Прилади типу ЕМА-4 [5] мають вбудовану смугову фільтрацію частот у діапазоні 30...1000 кГц (рис. 6) і вирішують цю проблему.

Можливим є завдання смуги пропускання та параметри кластеризації по кожному з 11-ти параметрів даних АЕ подій (координати, амплітуда, час наростання амплітуди до максимального значення, затримка, тривалість, осциляції, середня швидкість, шум, енергія, середня частота). Зазвичай більше виникає потреба використовувати нижню границю смуги, оскільки, згідно з досвідом, саме у нижній частині значень параметрів АЕ подій сконцентровані хибні дані. Дані випробувань зразків з відповідного металу (15Х1МФ), а також результати безперервного моніторингу показали, що встановлення комбінованої смуги фільтрів навіть з невеликими нижніми границями може вирішити проблему відбракування хибних сигналів АЕ. Ці сигнали мають, як правило, некоректні параметри, не є властивими до процесів накопичення пошкоджень і руйнування. Наприклад, сигнали з нульовим часом наростання однозначно відносяться до технологічних шумів, оскільки процеси виникнення та розвитку пошкоджень мають, як правило, певний ненульовий час зростання амплітуд сигналів до максимуму. Те ж саме стосується й малої тривалості події АЕ та кількості осциляцій. Комбінування смуг фільтра-

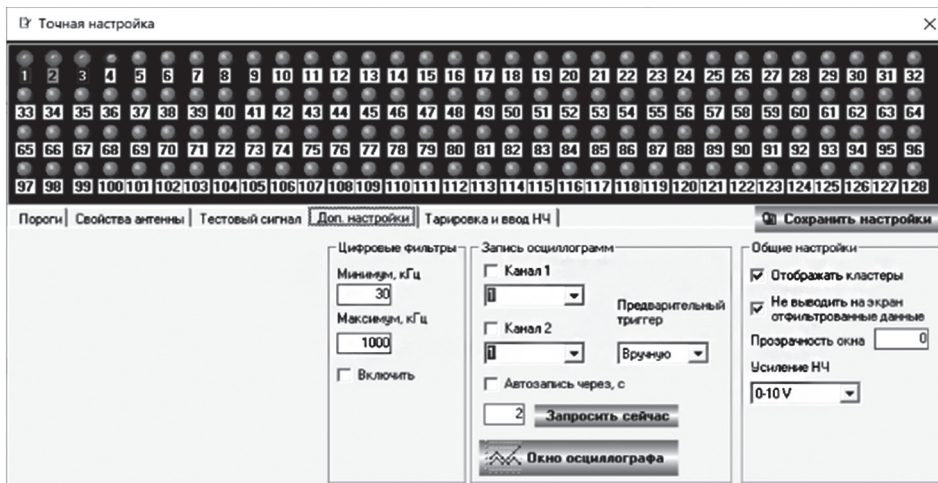


Рис. 6. Вікно програми ЕМА-3.92 з налаштуванням смугової частотної фільтрації

ції відбувається, як правило, експериментальним шляхом, на основі обробки великого обсягу даних, отриманих під час випробувань та експлуатації об'єктів контролю. Результати коректного використання програмних смугових фільтрів наведені на рис. 7, 8.

Особливу цікавість представляє те, що на рис. 7 і 8, на відміну від рис. 3 і 5, відсутні попередження 3-го та 4-го рівня, які позначаються відповідно червоним та чорним кольорами. Програма фільтрація даних АЕ надає необхідні умови для отримання достовірної інформації в умовах високих технологічних шумів.

Виділення інформативної складової не обмежується лише питанням відкидання зайвої інформації. Важливим залишається ще й спосіб обробки інформації, що залишається після попередньої фільтрації даних. На прикладі зразка зі сталі 17ГС покажемо (вибірково) результати багатопараметричної кластеризації даних.

Багатопараметрична кластеризація АЕ даних дозволяє:

- різними способами аналізувати та групувати дані АЕ подій;

- виділяти найоптимальніші смуги кластеризації, так звані радіуси, для точнішого отримання координат подій АЕ з певними характеристиками;
- детально аналізувати структуру матеріалу після точно проведеного кластерного аналізу.

Обробку даних було виконано з використанням програми ЕМА-3.92. Відстань між центрами датчиків становила 110 мм, контрольована зона – 140 мм (по 70 мм ліворуч і праворуч від центру зразка). Дані обробляли з використанням кластерного аналізу в процесі випробувань і при післяекспериментальній обробці. Події АЕ, що пройшли відбракування за координатною ознакою, об'єднували у кластери. Різні типи кластеризації показали зовсім інші розподіли подій АЕ, що дозволило відстежувати центри локалізації АЕ з певними характеристиками за довжиною зразка в межах контрольованої зони. Реєстрували сигнали АЕ у діапазоні 100...1000 кГц.

Типову діаграму випробувань зразків наведено на рис. 9. Умовні позначення даних на графіках та рисунках:  $P$  – навантаження, кг;  $A$  – амплітуда, дБ;  $A_v$  – шум, дБ;  $N$  – кількість подій АЕ;  $F$  – частота, Гц;  $Osc$  – кількість осциляцій;  $W$  – тривалість події АЕ, мкс;  $R$  – час наростання до мак-

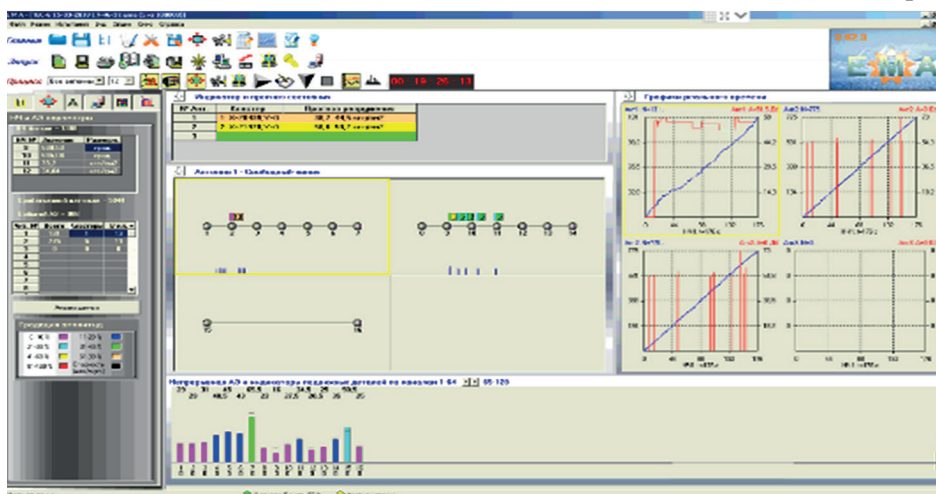


Рис. 7. Дані з труб ГПП після програмної фільтрації. Видно попередження 2-го рівня та прогноз руйнування по трубі № 1, попередження 1-го рівня та прогноз руйнування по трубі № 2. Активність АЕ на трубі № 3 відсутня

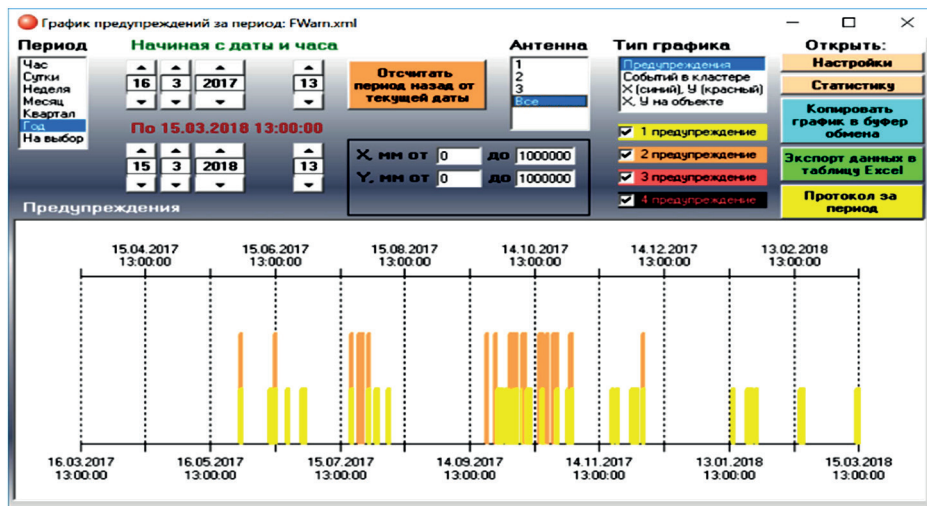


Рис. 8. Дані статистики попереджень після застосування фільтрації. Попередження про небезпеку 3-го та 4-го рівнів відсутні симуму амплітуди, мкс;  $X$  – координата події АЕ або кластера, мм.

Усі параметри на графіку (рис. 9), окрім активності  $N$ , надані згладженими для більшої наочності тенденції розвитку накопичення пошкоджень та зміни при цьому параметрів АЕ. Розподіл параметрів АЕ за довжиною зразка (координата  $X$ ) є нерівномірним, що й стало основою для введення і дослідження багатопараметричної кластеризації. На рис. 10–17 показано результати кластеризації за різними параметрами для того ж самого випробування зразка. На рисунках наведено екрани локації координат джерел АЕ програми ЕМА-3.92 з відображенням подій АЕ та результатів їх кластеризації. Розташування самих подій АЕ показано маленькими стовпчиками під схемою локаційної антени датчиків АЕ. Над схемою датчиків стовпчиками зі смугами різного кольору (різні діапазони амплітуди АЕ) показано кластери, сформовані за певною ознакою. Прапорець угорі кожного стовпчика показує кількість подій АЕ. Колір прапорця відображує ступінь безпеки у даній області кластеризації – від безпечного зеленого до критично небезпечного червоного.

Руйнування зразків відбувалося посередині, у послабленій частині зразка. Цей факт дозволяє аналізувати ефективність того чи іншого набору параметрів АЕ для кластеризації. Смуги, у межах яких відбувалася кластеризація (радіуси кластеризації), підбиралися шляхом експериментів з комп'ютерним повтором вже отриманих результатів випробувань. Підбір виконували таким чином, щоб забезпечити максимальну показовість та інформативність того чи іншого способу кластеризації. Найпершим подано традиційний варіант кластеризації за координатною ознакою, далі – деякі з отриманих даних за одиночними та комбінованими параметрами (всі перебрані та проаналізовані комбінації представити у рамках однієї статті неможливо).

До варіантів кластеризації, що показують максимальну небезпеку, віднесено:

- за координатною ознакою (два кластери, 34 і 37 подій АЕ відповідно у кожному);
- за часом наростання сигналу (1 кластер, 22 події);
- за найменшою ненульовою затримкою (1 кластер, 26 подій);
- за кількістю осциляцій (1 кластер, 32 події);

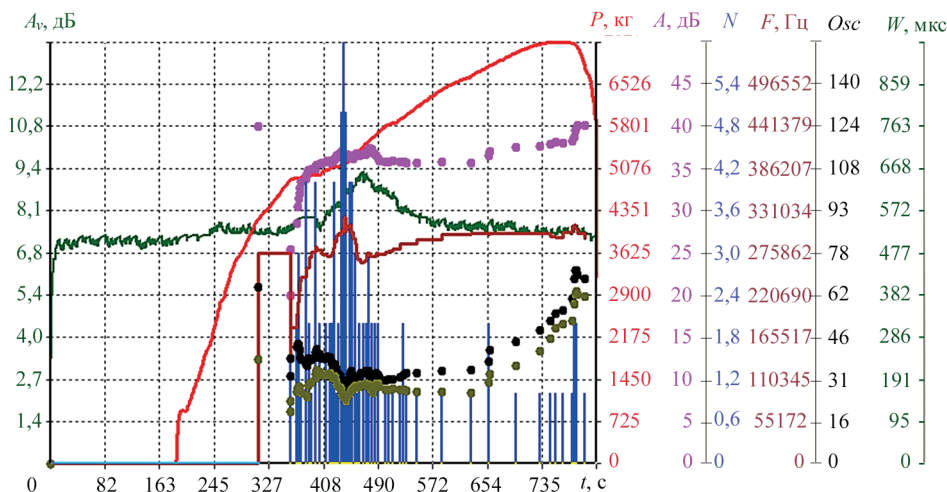


Рис. 9. Типова діаграма випробування зразка

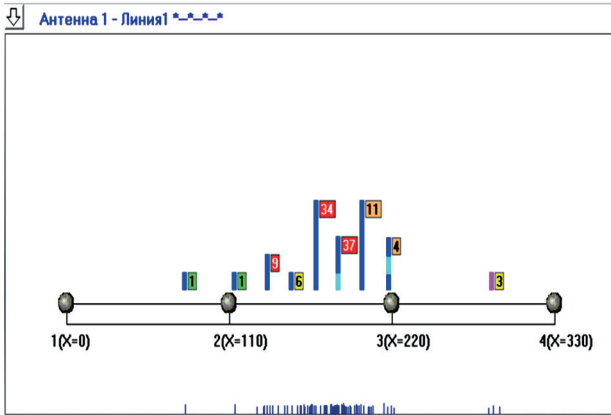


Рис. 10. Кластеризація за координатною ознакою. Радіус кластеризації 10 мм

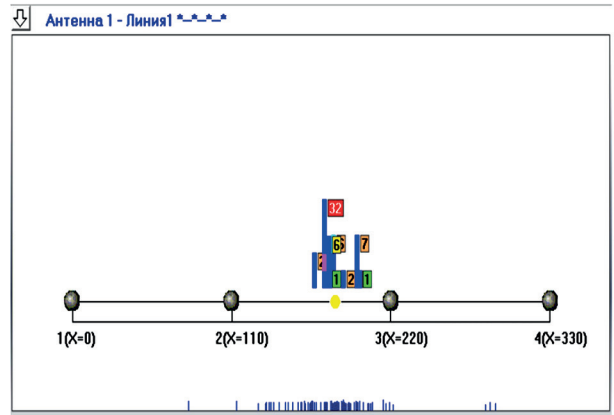


Рис. 14. Кластеризація за кількістю осциляцій у сигналі. Радіус кластеризації 10

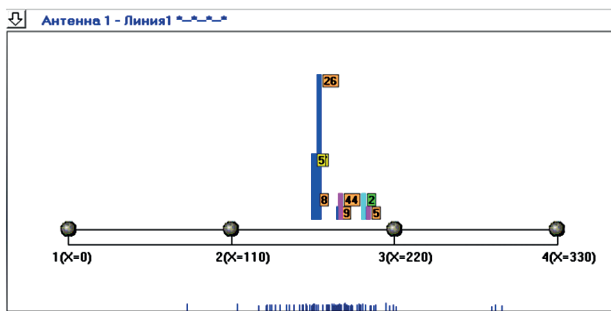


Рис. 11. Кластеризація за амплітудною ознакою. Радіус кластеризації 5 дБ

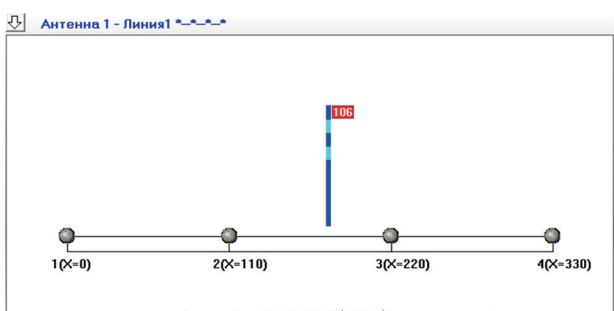


Рис. 15. Кластеризація за рівнем неперервної АЕ у сигналі. Радіус кластеризації 1 дБ

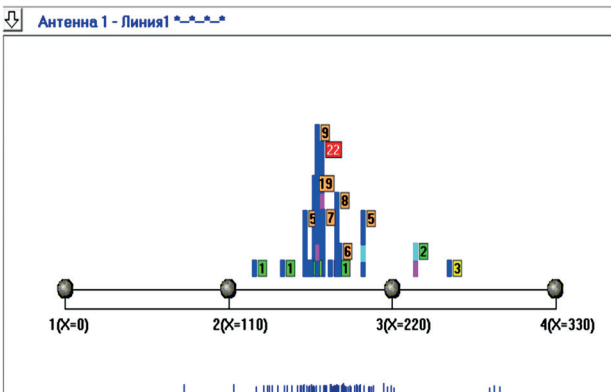


Рис. 12. Кластеризація за ознакою часу наростання сигналу. Радіус кластеризації 5 мкс

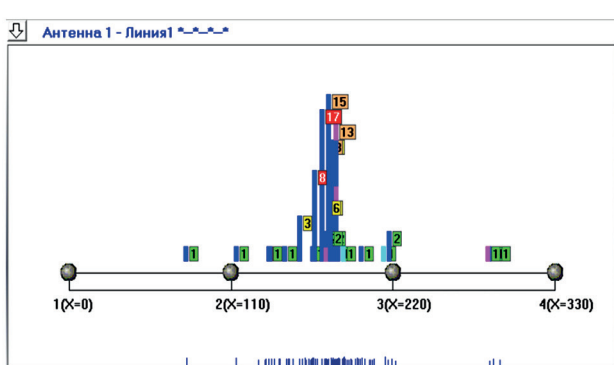


Рис. 16. Кластеризація за амплітудою та мінімальною затримкою сигналу. Радіуси кластеризації за амплітудою 5 дБ, за затримкою 5 мкс

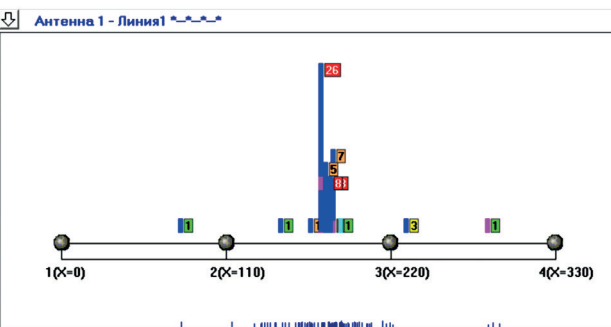


Рис. 13. Кластеризація за ознакою найменшої ненульової затримки сигналу. Радіус кластеризації 5 мкс

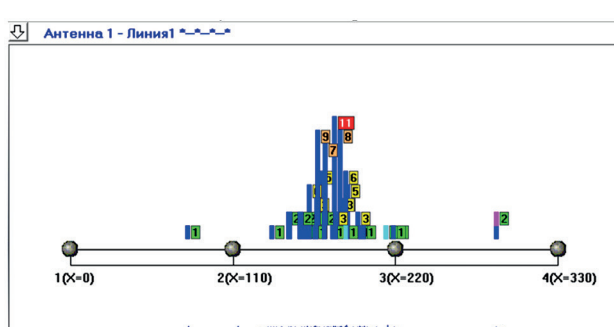


Рис. 17. Кластеризація за амплітудою та тривалістю сигналу. Радіуси кластеризації за амплітудою 5 дБ, за тривалістю 20 мкс

- за середньою швидкістю звуку (з кластери, 9, 14, 18 подій);
- за рівнем неперервної АЕ (1 кластер, 106 подій);
- за амплітудою та мінімальною затримкою (2 кластери, 8 і 17 подій);
- за амплітудою та тривалістю сигналу (1 кластер, 11 подій);
- за амплітудою та кількістю осциляцій (3 кластери, 13, 10, 19 подій);
- за амплітудою та умовною енергією (1 кластер, 13 подій).

Інші варіанти кластеризації показали лише максимальне попередження другого рівня і тому не можуть бути прийняті як рекомендовані до використання. Як бачимо, найкращим результатом кластеризації є варіант рівня неперервної АЕ.

Вибрано найоптимальніші варіанти кластеризації з точки зору розташування координат біля місця руйнування:

- за координатною ознакою (34 події АЕ);
- за амплітудною ознакою (26 подій);
- за часом наростання сигналу (22 події);
- за найменшою ненульовою затримкою (26 подій);
- за кількістю осциляцій (32 події);
- за рівнем неперервної АЕ (106 подій);
- за рівнем умовної енергії (101 подія);
- за амплітудою та мінімальною затримкою (17 подій);
- за амплітудою та кількістю осциляцій (19 подій);
- за амплітудою та швидкістю хвиль АЕ (10 подій).

Як бачимо, частина з двох переліків перетинається, і в обох випадках найточніші дані отримано шляхом кластеризації за поточним рівнем неперервної АЕ у сигналі. Відзначимо одразу, що:

- даний результат слід вважати не загальним, а характерним для конкретного типу випробувань і певного металу;
- оптимальність варіанту кластеризації за поточним рівнем неперервної АЕ була для авторів досить неочікуваною;
- «класичний» варіант кластеризації лише за координатною ознакою дає задовільні результати, хоча й не найкращі з отриманих.

## Висновки

На основі аналізу даних, що надходять з промислових об'єктів з високим рівнем шуму при

проведенні їх безперервного моніторингу, запропоновано підходи до послідовності та налаштування фільтрації параметрів сигналів АЕ, що надходять від датчиків, на різних стадіях – від безпосереднього отримання від приладу до обробки після формування подій АЕ.

Реалізовано можливість налаштування багато-параметричної кластеризації сформованих подій АЕ з вільним комбінуванням параметрів і смуг. Вивчено найперспективніші варіанти комбінування критеріїв кластеризації, проведено їх аналіз. Показано, що є оптимальні варіанти комбінування.

Результати проведених досліджень реалізовано у програмному забезпеченні ЕМА-3.92 щодо можливості налаштування цифрових програмованих фільтрів і можливостей встановлення та керування їх налаштуванням, завдання параметрів програмної фільтрації та багатопараметричної кластеризації.

## Список літератури

1. Назарчук З.Т., Скальський В.Р. (2009) *Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій*. Науково-технічний посібник. У 3-х томах. Київ, Наукова думка.
2. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А. та ін. (2022) Оцінка можливості застосування зміни розподілу параметрів акустичної емісії для удосконалення визначення стану матеріалів. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **1**, 31–38. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.01.03>
3. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*: Учебное пособие. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.
4. (2022) *Система технічної діагностики ЕМА-4*. Керівництво користувача. Київ, Индпром.
5. ДСТУ 4227-2003 *Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки*.

## References

1. Nazarchuk, Z.T., Skalskyi, V.R. (2009) Acoustic emission diagnostics of structural elements: Sci-Tekhn. Manual. In: 3 Vol., Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
2. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Yaremenko, M.A. et al. (2022) Evaluation of the possibility of applying a change in the distribution of acoustic emission parameters to improve determination of material state. *Tekh. Diahnost. ta Neruivniv. Kontrol*, **1**, 31–38 [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.01.03>
3. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2020) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures*: Manual. 5<sup>th</sup> ed. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Indprom [in Russian].
4. (2022) *System of technical diagnostics EMA-4. User guide*. Kyiv, Indprom [in Ukrainian].
5. DSTU 4227-2003 *Guidelines for conducting acoustic-emission diagnostics of objects of increased danger* [in Ukrainian].

## MULTISTEP FILTERING AND MULTIPARAMETRAL CLUSTERING OF AE EVENTS

S.A. Nedoseka, A.Ya. Nedoseka, M.A. Yaremenko, M.A. Ovsienko, O.I. Boichuk

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv. E-mail: [inpat59@ukr.net](mailto:inpat59@ukr.net)

Application of acoustic emission testing method and technical diagnostics systems of EMA family in critical industrial facilities allowed not only quickly obtaining information on their technical condition, but also improving the methodological approaches to data processing, based on the derived data, as well as control equipment and its software. This paper presents the results of the conducted analysis of the problem of filtering and optimal parameters of AE data clustering and verifying the effectiveness of the selected clustering methods on samples and structure elements. 5 Ref., 17 Fig.

*Keywords: acoustic emission, clustering, parameter change, structure elements*

Надійшла до редакції 26.06.2023