

ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТА ПІДХОДИ ДО ЇХ ВИРІШЕННЯ*

Вступ. У числі питань, що постають перед сучасною промисловістю, енергетикою та транспортом, забезпечення безпечної експлуатації та оцінка реального залишкового ресурсу конструкцій, вузлів та агрегатів займає одне з важливіших місць [1, 2]. Це пов'язано суттєвою мірою з тим, що значна частина об'єктів названих вище галузей відпрацювала свій плановий ресурс, деякі з них перевищили його у декілька разів і, тим не менш, продовжують експлуатуватися.

У якості прикладу науково обґрунтованих підходів до питань технічної діагностики розглянемо розробки в галузі методу акустичної емісії (АЕ). Даний метод заснований на явищах, що виникають у матеріалах при динамічній перебудові їх структури, яка відбувається переважно внаслідок впливу зовнішніх факторів, включаючи деформування конструкції робочими навантаженнями.

Відмінною особливістю АЕ технології є можливість оцінки стану конструкцій з наперед заданою точністю та ймовірністю (у системах безперервного моніторингу, що експлуатуються в даний час, ці показники при ймовірності певної події 0,95 дають похибку її оцінки $\pm 15\%$).

Технологія є унікальною, інноваційною та дозволяє:

- передбачити руйнівні навантаження, попереджати про небезпеку та запобігати аваріям, не припиняючи експлуатації;
- забезпечити великий фінансовий прибуток.

Діагностичне обладнання, встановлене на конструкції, дає змогу відстежувати її стан у будь-якій точці, яка має доступний для інтернету зв'язок із віддаленим центром контролю та аналізу.

Основні переваги:

- автоматизована оцінка ризику;
- онлайн передбачення руйнівного навантаження та залишкового ресурсу для конструкцій;
- повна автоматизація моніторингу та прогнозування;
- автоматизоване керування безпекою конструкції;
- проста інсталяція та інтеграція у промислові комп'ютерні мережі;
- використання стандартних мережевих протоколів і технологій.

Базовий варіант вказаної методики розроблено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (ІЕЗ). На її ос-

нові розвивається новий тип систем безперервного АЕ моніторингу.

Розроблено та впроваджено методи та інструменти для контролю безпеки споруд. Наразі системи безперервного АЕ моніторингу першого покоління працюють на деяких великих підприємствах України, наприклад, на чотирьох найбільших у Європі великотоннажних резервуарах (120 000 м³) та трубопроводах аміаку на Одеському припортовому заводі.

Джерела рентабельності створених систем безперервного АЕ моніторингу:

- скорочення простою виробництва;
- зниження кількості планових зупинок;
- запобігання аваріям;
- скорочення часу контролю;
- скорочення часу та витрат на пуск після випробування або ремонту;
- зниження витрат на оплату процедури контролю;
- зниження витрат на прийняття рішення про стан конструкції;
- спрощення роботи контролюючого персоналу;
- зниження витрат на діагностичне обладнання;
- уніфікація процедури контролю для всього виробництва;
- зниження витрат на заміну обладнання та програмного забезпечення за рахунок уніфікації обміну даними;
- зниження витрат на навчання фахівців.

У зв'язку з цим слід вважати важливим публікацію у 2022 р. стандарту [3]¹, який встановлює основні положення з технічного діагностування, показники та характеристики діагностування, вимоги до діагностичного забезпечення об'єктів діагностування.

Згідно зі стандартом перерахуємо основні завдання технічної діагностики конструкцій:

- визначення поточного технічного стану;
- визначення місць, що можуть являти загрозу для безпечного функціонування об'єктів діагностування;
- прогнозування технічного стану.

Для здійснення технічного діагностування об'єкту необхідно:

- встановити показники та характеристики діагностування;
- забезпечити пристосованість об'єкту до технічного діагностування;

¹ Розробники – ІЕЗ та ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України.

* Передрук статті з журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль». – 2022. – №2. – С. 3-10. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.02.01>

– розробити діагностичне забезпечення об'єкту.

Показники та характеристики діагностування, вимоги щодо пристосованості об'єкту до діагностування та діагностичного забезпечення об'єкту повинні включатися у технічні завдання та нормативно-технічну документацію, що розробляється у процесі проведення дослідно-конструкторських робіт.

Встановлюються такі показники діагностування:

– показники достовірності та точності діагностування;

– техніко-економічні показники.

Методи діагностування повинні визначатися, виходячи з встановлених завдань, і повинні включати в себе:

– діагностичну модель об'єкту;

– алгоритм діагностування та програмне забезпечення;

– правила вимірювання діагностичних параметрів;

– правила аналізу та обробки діагностичної інформації та прийняття рішення.

Розглянемо детально передумови та складові діагностування стосовно методу АЕ, які, відповідно до зазначеного стандарту, забезпечують кількісну оцінку стану об'єктів контролю з необхідними точністю та ймовірністю.

Діагностування поточного стану матеріалу конструкцій може проводитися руйнівними або неруйнівними методами контролю. До перших можна віднести випробування зразків-свідків або доведення до руйнування одного типового виробу з партії, на базі якого судять про стан інших. Основними недоліками руйнівних методів є вибірковість даних, погіршення поточного стану або повне руйнування конструкції. Неруйнівні методи контролю мають велику перевагу перед руйнівними, оскільки суттєво не впливають на стан конструкції та можуть бути використані багато разів або забезпечити постійний моніторинг стану конструкції на її робочих параметрах.

Незалежно від того, які методи контролю використовують, слід розуміти, що контроль є лише першою стадією діагностування. Результати контролю мають бути опрацьовані у тому сенсі, щоби отримати на виході кількісні показники поточного стану конструкції – прогнозоване руйнівне навантаження, несучу здатність, залишковий ресурс, тріщиностійкість або інші – із заданою точністю та ймовірністю.

Такі вимоги необхідні для забезпечення найвищої надійності результатів контролю, що, у свою чергу, вимагає застосування достатньо складних аналітичних методів, математичних досліджень високого рівня. Тому при розробці методик контролю дедалі ширше застосування отримують складні математичні моделі та втілення у практику результатів моделювання. Такий підхід дозво-

ляє отримати нормовані значення параметрів, що характеризують показники експлуатаційної надійності та можливого руйнування матеріалів у певних межах похибок і при наперед заданій ймовірності їхньої появи. Таким чином, суттєвого значення набуває «інженерна» математика, зв'язування фізичних процесів, що протікають у матеріалах при руйнуванні, з математичними образами цих процесів. Таке поєднання дозволяє у деяких випадках суттєво спростити рішення та отримати задовільні результати у тих завданнях, які раніше просто не можна було вирішити. Реалізація розрахунків оптимально виконується за допомогою сучасної комп'ютерної техніки, а їх результати з достатньою для практики точністю дозволяють отримати показники працездатності із зазначеними характеристиками.

Метод АЕ є одним з найбільш ефективних неруйнівних методів, який має ряд серйозних переваг під час його використання у промислових умовах. До таких переваг відносяться, перш за все, можливість стовідсоткового контролю всього обсягу матеріалу конструкції, контроль великих поверхонь малим числом датчиків, діагностування конструкцій без зупинки виробництва, виключення громіздких гідровипробувань та заміна їх на пневмовипробування. Велике значення набуває можливість використання діагностичної апаратури на основі акустичної емісії для управління процесом виробництва в умовах передаварійних та аварійних ситуацій, що дозволяє своєчасно вживати заходів для попередження аварій, забезпечуючи експлуатацію конструкцій за фактичним станом. Це стало причиною вибору методу АЕ у якості предмету наукових досліджень з технічної діагностики та розробки на його основі нових методів оцінки стану матеріалів.

За словами академіка Б.Є. Патона, який був засновником розвитку цього напрямку в ІЕЗ, «стрімкий розвиток науки та технологій дає перспективу широкого застосування акустичної емісії для створення інтелектуальних конструкцій та споруд, які із заданою точністю та ймовірністю самі повідомлятимуть про свій стан та пропонуватимуть заходи виходу із скрутних ситуацій».

За більш ніж 40-річний період досліджень вдалося створити необхідні теоретичні та методичні підґрунтя для вирішення цієї задачі з наступних складових:

- Експериментальні дослідження.
- Аналітичні дослідження хвильових та температурних полів.
- Математичне моделювання процесів у деформованому матеріалі, виникнення та розвитку пошкоджень і відповідної цьому АЕ.
- Статистична обробка та розпізнавання образів, побудова алгоритмів прогнозування руйнування та залишкового ресурсу.

- Чисельне вирішення аналітичних задач, програмування внутрішнього та зовнішнього інтерфейсів систем АЕ контролю з необхідними характеристиками.

Одразу слід відзначити, що вказані складові є обов'язковими, виконувалися поруч одна з іншими. Вилучення хоча б однієї з цих складових призвело б до неможливості отримати необхідні наукові результати, які дозволили у кінцевому рахунку створити повністю автоматизовані системи промислового рівня, що заздалегідь розпізнають небезпечний стан матеріалу конструкцій, попереджають про рівень безпеки, прогнозують руйнівне навантаження та залишковий ресурс з чіткими показниками точності та ймовірності. «Мозком» цих систем є програмне забезпечення, що алгоритмічно реалізує та втілює у життя ідеї авторів, «органами відчуття» є прилади, що отримують інформацію від датчиків АЕ та технологічну інформацію (тиск, навантаження, температура тощо).

Експериментальні дослідження. Інформація, яку отримують прилади АЕ, є настільки ємною, багатопараметричною, швидко змінною у часі, що опрацювання її без сучасної комп'ютерної техніки є практично неможливим. Саме тому стрімкий розвиток досліджень у галузі АЕ і створення в різних країнах приладів для АЕ вимірювань припав на початок 21-го століття і продовжується сьогодні – комп'ютери попередніх поколінь не встигали обробляти величезні потоки даних. Зараз практично в усіх розвинених країнах світу є підприємства, що виробляють швидкодіючу АЕ апаратуру з більш-менш подібними характеристиками. Зростає кількість каналів, що паралельно обробляють інформацію з багатьох датчиків, пропонуються різні варіанти обробки сигналів, що фіксує АЕ обладнання.

Таким чином, на сьогодні існує практично уся необхідна база для проведення експериментів у галузі АЕ та запису АЕ інформації.

Але далі постає питання обробки цієї інформації, вилучення з неї корисної складової та проведення оцінки стану конструкцій, що контролюються. У західних країнах це питання постало порівняно недавно та отримало назву «Structural health monitoring», дослідження активізувалися, але чітких нормованих критеріїв кількісної оцінки стану конструкцій за даними випробувань, моніторингу конструкцій або моделювання руйнування досі не отримано. З відповідних профільних видань, наприклад, «Structural durability and health monitoring» чітко видно, що дослідження поки що носять локальний характер і спрямовані на пошук підходів до вирішення цієї проблеми [4, 5]. Причиною цього є саме той факт, що з поля зору дослідників випала проста річ – питаннями оцінки стану матеріалу за даними АЕ, проведенням досліджень і їх інтерпретацією повинні займатися фахівці

в галузі міцності матеріалів у тісному контакті з акустиками, програмістами та приладобудівниками, у той час як світова практика йшла в іншому напрямку – відокремленість розробки апаратних засобів від потреб оцінки стану конструкцій. Тому основним досягненням, притаманним усім існуючим АЕ системам, є визначення координат джерел АЕ без чітких критеріїв подальшого аналізу даних, отриманих з відповідного джерела.

Фахівці з акустики та електроніки будували та продовжують будувати АЕ прилади, не маючи інформації, які саме дані потрібні для оцінки стану матеріалу. Фахівці у галузі міцності отримують вже готові прилади з певними параметрами та мають емпіричним шляхом визначати, як цими приладами користуватися для досягнення необхідного їм ефекту в оцінці стану матеріалів.

На відміну від цієї не зовсім вдалої практики, в ІЕЗ при розробці АЕ обладнання, проведенні експериментів, аналітичних дослідженнях та математичному моделюванні складних процесів, що відбуваються у матеріалах, поруч працювали фахівці у галузях міцності матеріалів, акустики, програмування та електроніки. У цьому ж сенсі можна позитивно відзначити роботу дослідників з Львівського Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України [6].

Саме завдяки тісній взаємодії фахівців різних напрямків вже у 2001 р. вдалося запустити на АТ «Одеський припортовий завод» у штатну експлуатацію першу в Україні систему безперервного моніторингу аміакосховища діаметром 52 м та висотою 21 м, яка не тільки відстежує поточний стан обичайки, попереджаючи про можливу небезпеку, але й прогнозує руйнівне навантаження. Складне та оригінальне програмне забезпечення моніторингових систем (зараз вже декілька таких систем встановлено на різних підприємствах України, зокрема на Київських ТЕЦ) було б неможливо створити без попереднього проведення аналітичних досліджень і математичного моделювання. При цьому результати таких досліджень і моделювання перевірялися на основі накопичених за багато років експериментальних даних – отриманих як під час випробувань зразків, так і при безперервному моніторингу промислових об'єктів.

Знання, що отримувалися, починаючи з моменту створення першої діючої АЕ апаратури, призвели до поступового складання плану аналітичних досліджень та математичного моделювання, а далі до розширення можливостей обробки АЕ даних за рахунок розвитку програмного забезпечення.

Представимо вибірково перелік деяких ключових моментів щодо кожного з перерахованих пунктів досліджень, оскільки все, що було зроблене у даному напрямку, надати в рамках однієї статті неможливо.

Аналітичні дослідження хвильових і температурних полів. Розроблений аналітичний апарат вирішення складних диференціальних рівнянь, доповнений чисельним програмуванням, дозволив описати складні хвильові процеси у матеріалах, а потім підтвердити експериментально наступне:

1. Акустичні хвилі, які генерують дефекти, що виникають у матеріалі під час розвитку пошкоджень, мають широкий спектр, певна частина якого може розповсюджуватися на вельми великі відстані, а швидкість руху може суттєво відрізнитися від загальноприйнятих. Експеримент, проведений на трубі аміакопроводу, показав можливість реєстрації джерел АЕ на відстані, більшій за 720 м. Аналогічні експерименти на трубах, якими транспортуються інші рідини (вода, нафта) також показують можливість фіксувати сигнали АЕ на відстані до 1 км.

2. Пошкодження у матеріалі призводять до зміни його акустичних властивостей, а саме до зниження амплітуд і збільшення часу наростання сигналів АЕ. Цей експеримент був підтверджений скануванням за допомогою АЕ датчиків-випромінювачів зразків металевих і композитних матеріалів загальною кількістю більше за 300. Аналогічний результат дає математична модель пошкоженості (див. нижче).

3. Розрахунки показали, що при високих температурах дефекти у багатьох металах випромінюють АЕ під час їх розвитку. Експеримент підтвердив наявність АЕ під час деформування та руйнування зразків (зокрема сталі 15Х2МФА та 15Х1М1Ф, що використовуються у тепловій та атомній енергетиці) при високих температурах.

4. Підтверджено, що широкосмугові датчики типу АЕД-01 дозволяють отримувати найбільш інформативну складову акустичного сигналу. Багаторічні випробування зразків, конструкцій і безперервний моніторинг окремих з них підтвердили високу чутливість датчиків, яку у деяких випадках доводиться примусово обмежувати за рахунок апаратних та програмних фільтрів, оскільки інакше доводиться обробляти завеликий потік інформації.

5. Показано, що групування сигналів АЕ у часі є більш інформативним для оцінки пошкоженості матеріалу, ніж форма та інші характеристики окремого сигналу. Експериментально це було підтверджено на базі випробувань близько сотні зразків. Як приклад, для сталі 20 випробування зразків, вирізаних із сусідніх ділянок пошкодженого матеріалу, дає принципово різну картину розподілу АЕ подій у часі. При цьому переріз зразків після розриву виглядає також неоднаково.

6. Залежність амплітуди сигналу АЕ від об'єму порожнини, що динамічно виникає в матеріалі, розраховану аналітично, у подальшому заклали до моделі накопичення пошкоджень.

Перераховані пункти щодо аналітичних досліджень дозволяють краще розуміти виникнення АЕ у деформованому матеріалі, але містять лише

підґрунтя для оцінки стану матеріалу конструкцій за даними АЕ. Так, спроба створити еталони для розпізнавання стану матеріалу, базуючись лише на статистичному наборі випробуваних зразків, дала не повністю задовільні результати, оскільки стало зрозумілим, що картина АЕ у матеріалі відображає з високою точністю розвиток полів пошкоджень, а у зразках (див. п. 5 вище) спостерігається суттєвий розбіг таких полів і відповідна їй картина розподілу подій АЕ у часі.

Для уніфікації еталонів пошкоженості було потрібно розробити модель виникнення АЕ у матеріалі, пов'язавши її з виникненням пошкоджень, а потім реалізувати розпізнавання поточного стану матеріалу.

Математичне моделювання процесів у деформованому матеріалі, виникнення та розвитку пошкоджень і відповідної цьому АЕ. Суттєву роль у розумінні складних процесів, що відбуваються в матеріалах під час накопичення пошкоджень і розвитку руйнування, зіграла співпраця з фахівцями Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. Роботи, що проводилися під керівництвом академіка А.О. Лебедєва і проф. М.Г. Чаусова (нині зав. кафедрою опору матеріалів у Національному аграрному університеті НАН України), стосувалися побудови повних діаграм деформування в умовах жорсткого навантаження і прецесійного дослідження процесів, що відбуваються у деформованому матеріалі на мікро- та макрорівнях. Поєднання проведення цих досліджень із застосуванням методу АЕ дозволило наочно виявити механізми виникнення АЕ при деформуванні та побудувати принципово нову модель накопичення пошкоджень, яка зокрема дозволяє за даними АЕ визначити поточну пошкоженість матеріалів.

Поштовхом для створення моделі стало комплексне дослідження матеріалів газопроводів України з різним строком експлуатаційного напруження. Визначення пошкоженості у залежності від строку напруження було виконане п'ятьма незалежними експериментальними методами: АЕ, скануванням імітатором АЕ сигналів, розсіянням мікротвердості, визначенням ударної в'язкості, зважуванням малих проб у рідині. Усі перераховані методи показали майже тотожні результати, що вкладаються у незначну похибку. Було доведено експериментально, що пошкоженість призводить до зростання внутрішнього об'єму порожнин у матеріалі. При цьому можна зафіксувати навіть зміну щільності матеріалу.

Таким чином, модель, що створювалася, мала пов'язати навантаження, виникнення, зростання та злиття порожнин у матеріалі, зміну при цьому акустичних властивостей матеріалу і виникнення сигналів акустичної емісії при кожному динамічному акті зміни внутрішнього стану матеріалу. Для зворотної перевірки у модель заклали також

емпірично отримане рівняння пошкодженості, яке дозволяло порівняти об'єм заданих моделлю пор з розрахунковим. Додатково модель перевіряли, закладаючи у неї не тільки структурний підхід (перекриття певної площини порою призводить до пропорційної зміни акустичних характеристик), а й дифракційний (для кожного такого перекриття розраховували дифракцію Фраунгофера, попередньо довівши, що саме вона має місце під час проходження акустичних хвиль крізь матеріал в умовах, які задавалися моделлю).

Особливістю моделі є відмова від використання традиційного методу скінченних елементів із заміною його об'єктно-орієнтованим моделюванням «розумних пор», тобто вся логіка зростання і взаємодії пор закладена в них усередині. Такий підхід дозволив вилучити вирішення складних рівнянь, що описують взаємодію елементів матеріалу на границях між ними, і сконцентруватися на умовах виникнення та поєднання пор при певних умовах. Це дозволило прискорити проведення віртуальних експериментів із накопичення пошкодженості у матеріалі та виникнення при цьому хвиль АЕ у багато разів, за рахунок чого кількість таких експериментів суттєво збільшилася, а це в свою чергу призвело до вдосконалення моделі.

Відзначимо, що подібний спосіб побудови моделі накопичення пошкоджень у інших авторів не знайдено.

Після створення та перевірки моделі на її базі отримали найбільш типові еталони пошкодженості та вже їх заклали в алгоритми розпізнавання стану матеріалу. Такі еталони, на відміну від отриманих на зразках, не прив'язані до конкретного матеріалу і досить складної форми зразка та добре показали себе під час розпізнавання поточного стану і прогнозування руйнування матеріалів.

Статистична обробка і розпізнавання образів, побудова алгоритмів прогнозу руйнування і залишкового ресурсу. Під час АЕ випробувань параметри, що реєструються, змінюються з величезною швидкістю. Роздільна здатність кожного АЕ каналу може складати, наприклад, 125 нс. Отримати при цьому повний, безперервно записаний сигнал АЕ, інакше кажучи, осцилограму, за 15 хвилин випробувань зразка важко навіть при одноканальному запису на найсучаснішій комп'ютерній техніці, оскільки по мірі накопичення даних швидкість їх обробки стрімко падає. Багатоканальний запис осцилограм призводить до гальмування роботи комп'ютера ще швидше. У той же час форма сигналу на вході АЕ обладнання залежить від такої кількості чинників, що не може бути без додаткової, надзвичайно складної обробки ототожнена з формою початкового сигналу, що випромінював дефект.

Тому на даному етапі розвитку електроніки і комп'ютерної техніки значно простіше брати в обробку не всю осцилограму, а певні її характеристики – час надходження, тривалість, максимум амплітуди,

час наростання до максимуму амплітуди, кількість коливань (осциляцій) у сигналі. Навіть ці скорочені дані потребують швидкісної обробки. Слід сказати, що паралельно даним АЕ сучасні системи мають реєструвати технологічну, як правило, низькочастотну (НЧ) інформацію, бажано не один, а декілька параметрів, що характеризують процес навантаження зразка або експлуатації конструкції.

З перерахованих даних складається вектор, що постійно змінюється у часі та може бути охарактеризований як «Вектор Стану Матеріалу» (ВСМ). Статистична обробка інформації, що надходить під час АЕ випробувань, має формувати ВСМ таким чином, щоби можна було порівнювати його з еталонним, отриманим за допомогою попередніх досліджень зразків, або побудованим математичною моделлю.

Після визначення класифікаційних параметрів, що мають входити до ВСМ, у дію вступає класична схема розпізнавання образів. Вона працює значно швидше, ніж, наприклад, нейронні мережі, та придатніша для роботи з динамічною, різко змінюваною у часі інформацією. Методику розпізнавання образів давно розроблено, але основною проблемою при її використанні є саме підбір найважливіших класифікаційних ознак.

Під час розпізнавання ВСМ, що є саме набором класифікаційних ознак, опрацьовується шляхом знаходження найбільш відповідного еталону. Якщо при цьому виникає розбіжність, у дію вступає корекція, яку ще називають самонавчанням, що дозволяє динамічно, у реальному часі зблизити дані ВСМ і відповідного еталону. Оскільки еталони містять дані щодо відсотка поточного для еталону навантаження відносно руйнівного, приймається гіпотеза, що і для реальних даних АЕ та НЧ на поточний момент розпізнавання такий відсоток співпадає. Це і є прогнозом руйнівного навантаження у дії. Далі залишається задати, який відсоток від руйнівного навантаження являє певний рівень небезпеки, що у результаті дає класифікацію ступеня небезпеки під час АЕ випробувань зразків або конструкцій.

Реалізований у системах АЕ діагностики типу ЕМА прогноз руйнівного навантаження перевірено на сотнях зразків плоского та круглого перерізу, зі зварними швами та без них, які руйнували у принципово різних умовах навантаження і температур. Також зруйновано декілька трубно-оболонкових конструкцій під час планових випробувань, що передбачали руйнування.

Алгоритми прогнозу та попередження про небезпеку реалізовані у програмному забезпеченні (ПЗ) для систем АЕ діагностики типу ЕМА. Результати їх роботи дають підґрунтя для оцінки залишкового ресурсу. Оцінку цього параметру може бути виконаною лише за результатами моніторингу конструкцій протягом певного часу. Найгіршим з точки зору точності є набір даних для двох точок у часі, наприклад, для матеріалу у стані постав-

ки та для нього ж після певного часу експлуатації. Екстраполяція за двома точками дає приблизний та занижений результат, тому на практиці використовують паралельно два різних підходи, вибираючи з розрахованого ресурсу найменший.

Перший підхід базується на описаних вище експериментах з оцінки пошкодженості досить широкого набору металевих матеріалів п'ятьма різними методами. Отримані дані дозволили будувати номограми для визначення залишкового ресурсу на основі визначеної будь-яким методом пошкодженості.

Другий підхід оснований на відстежуванні прогнозу руйнівного навантаження під час експлуатації промислових об'єктів, обладнаних системами моніторингу типу ЕМА. Прогноз руйнівного навантаження коливається в часі, у залежності від поточних умов експлуатації конструкції. Екстраполяція прогнозованої кривої у бік майбутнього дає можливість побудувати криву залишкового ресурсу на основі лінії тренду прогнозованих даних.

Далі залишається вибрати найгірше з отриманих значень прогнозованого ресурсу та прийняти за основне. Важливо відзначити, що перевірка розрахунку ресурсу може бути лише приблизною, оскільки реальний ресурс вичерпується після руйнування конструкції, а основною метою діагностики є протилежна мета – не допустити руйнування.

Чисельне вирішення аналітичних задач, програмування внутрішнього і зовнішнього інтерфейсів систем АЕ контролю із необхідними характеристиками. Вихідним продуктом аналітичних досліджень у галузі АЕ мають бути вельми складні рішення диференціальних рівнянь. Як правило, напругу ці рівняння вирішити надзвичайно важко або взагалі неможливо із застосуванням сучасного математичного апарату. Тут на допомогу стає використання, по-перше, інженерного підходу до вирішення таких задач, по-друге, чисельне вирішення на комп'ютері отриманих кінцевих інтегральних рівнянь. Інженерний підхід дозволяє спростити процес вирішення аналітичних задач, додавши до нього певні обмеження, що диктуються здоровим глуздом і вже отриманими результатами фізичних експериментів. Це дозволяє у багатьох випадках замінити змінні величини константами, накласти додаткові граничні та початкові умови, які суттєво спрощують процес рішення. Незважаючи на це, кінцеве рішення частіше за все виконується чисельним шляхом, оскільки точне аналітичне рішення подвійних або потрійних інтегралів можна отримати далеко не завжди. Тут програмування починає грати ве-

личезну роль, оскільки, по-перше, автоматизує розрахунок і дозволяє отримати рішення у широкому діапазоні вхідних даних; по-друге, дає можливість легко знайти та виправити помилки, які можна випадково допустити у складних розрахунках; по-третє, дозволяє візуально представити результати розрахунків у вигляді таблиць, графіків необхідного формату, у тому числі в динаміці. Більшість задач було вирішено саме таким чином.

Паралельно з вирішенням аналітичних задач виконувалося та продовжує виконуватися створення і модернізація ПЗ для комп'ютеризованих систем АЕ діагностики. Переламним моментом у розвитку ПЗ стало створення у кінці 90-х років 20 ст. програм для систем ЕМА третього покоління. Вони отримали відразу декілька принципово нових, порівняно з попередніми, можливостей, які змінили як взаємодію з АЕ обладнанням, так і обробку даних АЕ вимірювань:

1. Перехід на 32-х-розрядні багатозадачні операційні системи Windows дозволив виконувати у рамках однієї програми одночасне виконання завдань з отримання даних, налаштування параметрів вимірів, обробку та виведення на екран результатів у реальному часі.

2. Уперше запропоноване для систем типу ЕМА використання мережевих протоколів TCP/IP і UDP дозволило інтегрувати постійно діючі АЕ системи у внутрішню мережу підприємств, організувати взаємодію між ними, віддалений доступ і керування через мережу Інтернет, захистити життя та здоров'я оператора за рахунок його віддалення від об'єкту контролю. Зараз такий спосіб роботи поступово стає стандартним у світовій практиці.

3. Забезпечено можливість роботи програм типу ЕМА з АЕ приладами різних моделей і виробників (ЕМА-2, 3, 4, Галс-1), незважаючи на відмінність протоколу обміну і структур даних, що опрацьовуються, за рахунок внутрішньої модульної структури і використання поліморфних класів. Можливе достатньо просте розширення переліку АЕ приладів, з якими програма зможе працювати.

4. Прийняте свого часу рішення щодо постійної модернізації ПЗ ЕМА показало свою ефективність, оскільки дозволяє, по-перше, реалізовувати найновіші ідеї і досягнення у даній галузі, по-друге, швидко відгукуватися на вимоги промислових підприємств, що експлуатують дані системи. Зокрема на замову були створені сервісні програми, що забезпечують надійну роботу систем типу ЕМА на виробництві та взаємодію кількох систем у рамках однієї мережі, накопичують статистику попереджень і небезпечних ділянок об'єктів моніторингу.

5. Спеціальні програми забезпечують інтеграцію з Microsoft Office, дозволяючи автоматично отримувати відформатовані та готові для друку звіти, протоколи, таблиці та графіки, а також, за необхідності, додавати користувачеві власні алгоритми обробки отриманих даних.

6. Створено програми, що обробляють статистику попереджень і прогнозу руйнування за вибраний час – від кількох годин до кількох років, із побудуванням таблиць і графіків, які полегшують аналіз небезпечних моментів і небезпечних ділянок під час експлуатації об'єктів безперервного моніторингу.

7. Розроблено систему надання на основі статистики моніторингу так званої «Нормованої інтелектуальної поради», яка реалізована у спеціальному ПЗ (поки що працює лише на АТ «Одеський припортовий завод») і надає операторам рекомендації у разі виникнення небезпечних ситуацій відповідно до нормативної документації.

Таким чином, ідею Б.Є. Патона щодо перспектив інтелектуальних конструкцій можна вважати у значній мірі втіленою у практику.

Незважаючи на це, слід вказати, що багато питань АЕ діагностики потребують подальших математичних і експериментальних досліджень, зокрема відновлення початкової форми та параметрів сигналу від джерела АЕ на основі даних, отриманих апаратурою, детальний аналіз розподілу АЕ параметрів і його вдосконалення, оцінка стану конструкцій за даними АЕ з конструкцій з обмеженим доступом, програмне керування процесом виробництва на основі даних діагностування та багато інших.

Відповідно до сказаного вище, слід звернути увагу на ширше та глибше використання аналітичних методів при вирішенні задач оцінки зміни стану матеріалів конструкцій у процесі їх експлуатації. При цьому основний акцент необхідно зробити на комплексному використанні фундаментальних та інженерних досліджень, оскільки основу сучасної АЕ діагностики становлять прив'язані до її конкретних завдань математичні дослідження у галузі міцності матеріалів, на базі результатів яких вирішують питання у галузях акустики, програмування та приладобудування.

Висновки

1. Технічне діагностування конструкцій методом АЕ має спиратися на результати фундаментальних досліджень, які включають аналітичні розрахунки, математичне моделювання, статис-

тичну обробку даних і розпізнавання образів. Кожна з цих складових повинна мати експериментальне підтвердження.

2. Результатом діагностування мають бути кількісні показники стану конструкції, що діагностується, отримані із заданою точністю та ймовірністю.

3. Вимірювальна АЕ апаратура, навіть найвищої якості, сама по собі не забезпечує технічного діагностування об'єктів контролю. Вона дозволяє лише отримати дані випробувань або моніторингу конструкцій, тобто забезпечує їх початковий неруйнівний або руйнівний контроль.

4. Завдання оцінки стану конструкцій, тобто їх діагностики, вирішують інтелектуальні технології, закладені у програмне забезпечення, що обробляє інформацію з АЕ приладів.

5. Для успішного вирішення завдань АЕ діагностики питаннями оцінки стану матеріалу, проведенням досліджень та їх інтерпретацією повинні займатися фахівці в галузі міцності матеріалів у тісному контакті з акустиками, програмістами та приладобудівниками.

6. Сучасні досягнення АЕ діагностики забезпечують у перспективі можливість програмного керування безпекою процесу виробництва на основі даних моніторингу задіяних у цьому процесі конструкцій.

7. Запропоновані складові досліджень у галузі АЕ діагностики можуть бути достатньо ефективно використані при розробці інших існуючих методів діагностування стану матеріалів конструкцій.

Список літератури

1. Патон Б.Е., Лобанов Л.М. Недосека А.Я. и др. (2012) *Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: Теория, методы, технологии, средства, применение*. Киев, Индпром.
2. 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.
3. ДСТУ 9118:2022. *Технічна діагностика. Діагностування технічного стану матеріалів конструкцій. Загальні вимоги*.
4. Amirabbas Haidarpour, Kong Fah Tee (2020) Finite Element Model Updating for Structural Health Monitoring. *Structural Durability & Health Monitoring*, 14, 1, 1–17. DOI: <https://doi.org/10.32604/sdhm.2020.08792>
5. Junyu Chen, Yunwen Feng, Cheng Lu, Chengwei Fei (2021) Fusion Fault Diagnosis Approach to Rolling Bearing with Vibrational and Acoustic Emission Signals. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 129, 2, 1013–1027. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmescs.2021.016980>
6. Назарчук З.Т., Скальський В.Р. (2009) *Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій. Науково-технічний посібник. У 3-х томах*. Київ, Наукова думка.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.
Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека, С.А. Недосека,
М.А. Яременко, М.А. Овсієнко