



✉ Correspondence author

O. A. Basalkevych
oleksandr.a.basalkevych@lpnu.ua

Article received 17.10.2023 p.

Article accepted 26.10.2023 p.

UDK 620.16: 620.91: 004.67

УДК 620.16: 620.91: 004.67

О. А. Басалкевич, Д. В. Рудавський

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

СУЧАСНИЙ СТАН ПІДХОДІВ ДО МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЛОПАТЕЙ ВІТРОВИХ ТУРБІН З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Вітрова енергетика є одним із найважливіших та найперспективніших джерел екологічно чистої відновлюваної енергії. Для підвищення надійності та безпечності експлуатації вітрових турбін, а також для зниження витрат через технічне обслуговування та простої у неробочому стані необхідно застосовувати сучасні методи моніторингу стану великогабаритних та високонавантажених деталей вітрових електростанцій з використанням інформаційних технологій. Розглянуто основні види дефектів та їхню класифікацію. Проаналізовано вплив швидкості обертання турбіни та наявності тріщини у лопаті на власні частоти коливання робочого тіла. Наведено основні види і методи неруйнівного контролю (НК). Детально розглянуто акустичний метод, оскільки він стрімко розвивається та є перспективним для галузі зеленої енергетики. На основі опрацьованої літератури подано класифікацію акустичних методів НК. Здійснено аналітичний огляд публікацій, що розглядають методи НК для діагностики лопатей вітрових турбін, зокрема з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Наведено переваги та недоліки кожного з методів. Проаналізовано підхід до НК вітрових електричних станцій із використанням машинного навчання на основі гауссівських процесів для прогнозування власних частот коливань однієї лопаті за статистичними даними розподілу власних частот коливання сусідніх лопатей та температури навколишнього середовища. Наведено опис повного циклу функціонування системи від збирання даних до прийняття рішення про можливу наявність дефекту в конструкції. Розглянуті підходи можуть слугувати основою для розроблення нових високонадійних методів виявлення небезпечних дефектів у матеріалі лопаті на ранніх стадіях їх розвитку.

Ключові слова: відновлювана енергетика; методи неруйнівного контролю; акустичний НК; машинне навчання; БПЛА.

Вступ / Introduction

Сьогодні вітрова енергетика є одним із найважливіших та найперспективніших джерел екологічно чистої відновлюваної енергії. Останніми роками спостерігається активний розвиток у цьому напрямі енергетики, що дає змогу будувати значно більші та технічно досконаліші високопотужні вітрові турбіни, які здатні виробляти до 80 гігават-годин електроенергії за рік.

Однак для підвищення надійності та безпечності їх експлуатації, а також для зниження великих затрат на технічне обслуговування та скорочення тривалих періодів простою неробочих турбін необхідно застосовувати сучасні ефективні технології моніторингу стану великогабаритних та високонавантажених деталей вітрових електростанцій.

Об'єкт дослідження – зародження та розвиток дефектів, що виникають у лопатях вітрових турбін під час функціонування.

Предмет дослідження – сучасні методи неруйнівного контролю, що використовують інформаційні технології.

Мета роботи – систематизація та оцінювання актуальних методів моніторингу технічного стану конструкцій з погляду їх застосування до лопатей вітрогенераторів на основі сучасних методик неруйнівного контролю та інформаційних технологій.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- аналіз основних видів дефектів та їх класифікація;
- систематизація основних видів та методів неруйнівного контролю;
- синтез класифікації акустичних методів неруйнівного контролю на основі розглянутої літератури;
- оцінювання сучасних методів неруйнівного контролю лопатей вітрових турбін із використанням інформаційних технологій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз наукової літератури дає підставу стверджувати, що види та методи НК добре описані у наукових дослідженнях вітчизняних вчених. Зокрема питання НК металевих конструкцій розглянули такі автори: О. Є. Андрейків, В. М. Пустовий, Д. В. Рудавський [2], З. Т. Назарчук, В. Р. Скальський, В. В. Кошовий [3], А. Я. Недосека [15, 16] та ін. Їхнє сучасне застосування із використанням інформаційних технологій детально висвітлено у наукових працях зарубіжних вчених: F. P. G. Márquez, A.-M. Chacón [35], D. Zhang, K. Burnham, L. McDonald, C. Macleod, G. Dobie, R. Summan, G. Pierce [19] та ін. У цій статті проаналізовано теоретичні відомості про дефекти та види НК та

систематизовано останні результати досліджень у галузі моніторингу технічного стану лопатей вітрових турбін із використанням інформаційних технологій.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Основні види дефектів та їх класифікація. Одне із основних завдань технічної діагностики – раннє виявлення небезпечних дефектів у конструкційному елементі конструкції, які можуть спричинити його передчасні несправності та відмови в експлуатаційному режимі. Під дефектом розуміють невідповідність або відхилення від заданих вимог, стандартів або специфікацій, які можуть негативно впливати на якість, працездатність або безпеку експлуатації об'єкта. Залежно від типу дефектів для їх виявлення застосовують різні методики технічної діагностики. Основні види експлуатаційних дефектів та пошкоджень залежать від природи об'єкта експлуатації. Проте можна виокремити певні загальні категорії.

Механічні ушкодження, спричинені впливом механічної сили на об'єкт. До них належать: тріщини, злами, сколи, подряпини, деформації.

Корозія, що являє собою руйнування матеріалу через хімічну реакцію із навколишнім середовищем. Продуктом прояву корозії металевих конструкцій є іржа.

Стирання поверхонь об'єктів під час експлуатації внаслідок їх тертя та зношення. Основними проявами є втрата глянцею, вицвітання, пошкодження шару фарби, зменшення товщини матеріалу.

Втома матеріалу зазвичай спостерігається в елементах конструкцій, що зазнають циклічних, тобто змінних у часі, навантажень. Поступово виникають мікротріщини, які можуть призвести до повного руйнування матеріалу.

Наявність дефектів не обов'язково означає втрату працездатності виробу. Їх небезпечність залежить від багатьох конструктивних та експлуатаційних чинників. За ступенем впливу на експлуатаційні властивості виробу дефекти поділяють на *критичні, значні та мало-значні.*

До *критичних* зараховують дефекти, які серйозно впливають на працездатність та безпеку використання виробу. Вони іноді потребують негайного втручання та заміни виробу. Під *значними* розуміють дефекти, які істотно впливають на працездатність виробу та його залишковий термін експлуатації. Такий виріб може потребувати ремонту або заміни у найближчій перспективі. *Малозначними* вважають дефекти, які істотно не впливають на використання виробу за призначенням та його довговічність. Найчастіше вони є косметичними та проявляються у вигляді подряпин поверхні.

Найнебезпечнішими вважають тріщиноподібні дефекти, оскільки вони є концентраторами механічних напружень і можуть стрімко розвиватися у ході експлуатації виробу.

За можливістю усунення дефекти також поділяють на *усувні та неусувні.* До перших належать такі, усунення яких є можливим та економічно доцільним. Якщо усунення дефекту технічно неможливе або пов'язане з великими витратами, його вважають неусувним.

За розміщенням дефектів у виробі їх класифікують на *поверхневі, підповерхневі, внутрішні, наскрізні та*

дефекти з'єднань. Такий поділ також пов'язаний із можливостями різних фізичних методів неруйнівного контролю.

За природою походження дефекти поділяють на *схемно-конструктивні, виробничо-технологічні, дефекти випробувань та експлуатаційні.* До *схемно-конструктивних* дефектів зараховують помилки та невідповідність у проектуванні виробу або конструкції. Це можуть бути неправильні розміри та розміщення компонентів, помилки у розрахунках та похибки, які впливають на функціональність та безпеку використання. *Виробничо-технологічні* дефекти виникають від час виготовлення виробу. *Дефекти випробувань* виявляють під час випробувань та контролю виробу на відповідність заданим вимогам. Основним механізмом їх виявлення є фізичне моделювання екстремальних експлуатаційних навантажень. *Експлуатаційні дефекти з'являються* під час експлуатації та зберігання виробів [1], [2].

Основні види і методи неруйнівного контролю. Неруйнівний контроль (НК) – це метод перевірки та інспекції об'єктів без їх руйнування чи пошкодження. Окрім енергетичної, його широко застосовують у багатьох інших галузях, зокрема у виробництві, будівництві, авіації, нафтогазовій промисловості та обслуговуванні інфраструктури.

Класифікацію видів і методів НК відображено у відповідних літературних джерелах та нормативних документах [3–10]. В ДСТУ 2865-94 [11] виділено 13 видів НК: магнітний, електричний, електромагнітний (вихрострумний), радіохвильовий, тепловий, оптичний, радіаційний, акустичний, органолептичний, візуальний, візуалізація та фотографування у полях високої напруженості, електрогазодинамічний та метод проникних речовин.

Кожен із видів НК поділяють на методи за такими ознаками [1]:

- характер взаємодії зондувальних дій (фізичних полів або проникних речовин) з об'єктом НК (ОНК);
- первинний інформативний параметр – конкретна характеристика носія інформації – фізичного поля чи проникної речовини, зміни якої використовують для отримання інформації про контрольовану ознаку ОНК;
- спосіб одержання первинної інформації (визначається видом проникної речовини або первинного перетворювача, які використовують для вимірювання та реєстрації первинного інформативного параметра).

Метод НК може бути справді інформаційно цінним лише тоді, коли взаємодія між полем чи проникною речовиною та контрольованою ознакою ОНК спричиняє певні зміни у фізичному полі чи стані проникної речовини, які є достатніми для подальшого виявлення та ідентифікації. Розглянемо деякі найпоширеніші методи НК.

Візуальний та оптичний НК. Цей метод ґрунтується на безпосередньому спостереженні об'єкта, щоб визначити наявність видимих пошкоджень, дефектів або невідповідностей. Візуальний контроль може виконувати людина без будь-якого додаткового обладнання або за допомогою оптичних інструментів, наприклад,

мікроскопа або бінокля. Також використовують роботизовані оптичні системи для збирання даних із подальшим обробленням фото- та відеоматеріалу за допомогою сучасних інформаційних технологій.

Електричний НК. Ґрунтується на реєструванні параметрів електричного поля, що взаємодіє з ОНК або виникає у контрольованому об'єкті внаслідок зовнішнього впливу. Застосовується переважно для контролю напівпровідникових та діелектричних матеріалів.

Магнітний НК. Метод використовує магнітні поля для виявлення дефектів чи неоднорідностей у магнетиках. Магнетизацію об'єкта здійснюють, щоб виявити зміни у магнітному полі, спричинені дефектами.

Електромагнітний (вихрострумний) НК. Застосовується для виявлення дефектів або неоднорідностей в електропровідних матеріалах. Оснований на створенні електромагнітних вихорів за впливом змінного магнітного поля на матеріал. Зміна електричного опору внаслідок вихрових струмів дає змогу виявити дефекти.

Тепловий НК. Оснований на вимірюванні теплового розподілу в об'єкті для виявлення дефектів чи неоднорідностей. Цей метод використовує різні принципи, такі як інфрачервона термографія та термічний потік, для аналізу теплової поведінки об'єкта. Він дає змогу виявити дефекти типу тріщини, неоднорідності товщини та проблеми з ізоляцією.

Радіаційний НК. Ґрунтується на реєструванні та аналізі іонізуючого випромінювання після взаємодії з об'єктом контролю. Найширше застосовують рентгенівське та гамма-випромінювання, придатні для контролю виробів з різноманітних матеріалів. У загальному обсязі застосовуваних у промисловості фізичних видів НК радіаційний становить не менш як 50 %.

Однак, незважаючи на значну кількість та різноманітність використовуваних сьогодні методів НК, кожен з них має як певні переваги, так і недоліки у застосуванні, залежно від особливостей ОНК та типів дефектів у їх матеріалі. Одні із найефективніших та перспективних методів моніторингу технічного стану, які сьогодні застосовують на практиці для діагностування великогабаритних деталей сучасних вітрових турбін, ґрунтуються на акустичних методах НК.

Класифікація методів акустичного НК. Акустичний НК використовує звукові та ультразвукові хвилі для оцінювання стану матеріалів та структур без їхнього руйнування. Він дає змогу виявити тріщини, пустоти та підповерхневі пошкодження. Найчастіше використовують пружні хвилі ультразвукового діапазону (частота понад 20 кГц). Акустичні методи НК застосовні до широкого спектра матеріалів, таких як метали, пластмаса, кераміка, бетон тощо.

Розрізняють активні та пасивні методи акустичного НК.

У пасивних методах (акустико-емісійний, власного випромінювання) спостерігають за параметрами пружних коливань, що виникають в ОНК під час їх роботи або під впливом зовнішніх вимушуючих факторів. Акустико-емісійний метод ґрунтується на явищі акустичної емісії, яке полягає у тому, що пружні хвилі випромінює сам матеріал унаслідок внутрішньої динамічної локальної перебудови його структури [13], [14]. У методі власного випромінювання використовують поля акус-

тичного діапазону – шумові та вібраційні, які генерують механізми, працюючи. Деякі параметри цих полів містять інформацію про наявні дефекти.

Активні акустичні методи вимірюють параметри акустичного поля після того, як воно взаємодіє з ділянкою контролю. Вони значно поширеніші за пасивні та різноманітніші за схемами застосування. Розрізняють методи проникного і відбитого випромінювання, комбінованих на їх основі, імпедансні, а також методи власних частот [4], [5], [12].

Методами проникного випромінювання вивчають ультразвуковий сигнал, що пройшов крізь контрольовану ділянку. Сигнал, що сформувався під час відбиття зондувальної хвилі від дефекту, аналізують методами відбитого випромінювання. У комбінованих методах використано принципи як проходження, так і відбиття хвиль.

Методи, що використовують власні частоти, ґрунтуються на вимірюванні частот коливань ОНК, які можуть бути вимушеними або вільними. Вільні коливання, зазвичай, спричинені механічним ударом, тоді як вимушені коливання виникають під впливом зовнішньої вимушуючої сили.

В імпедансних методах використано залежність пружних імпедансів виробів, що коливаються, від геометрії, фізичних властивостей і наявних дефектів.

На основі аналізу [1] побудовано класифікацію методів акустичного НК (див. рис. 1).

Сучасні напрями розвитку методів акустичного НК націлені на створення безконтактних ультразвукових випромінювачів і приймачів пружних коливань, електромагнітно-акустичних перетворювачів, пошук способів та створення засобів прецизійного вимірювання швидкості поширення ультразвуку. Значну увагу звертають і на розроблення відповідних інформаційних технологій, програмного та апаратного забезпечення.

Основні методи неруйнівного контролю елементів вітрових турбін. Нині вітрова енергія є одним із найважливіших джерел відновлюваної енергії, останніми роками демонструє експоненційне зростання. У цій галузі важливо знижувати витрати на експлуатацію та обслуговування, а також підвищувати надійність та безпеку установок. Будь-яка несправність лопатей вітряних турбін призводить до тривалих простоїв, значних витрат і зниження вироблення енергії.

Технічний стан лопатей вітрових турбін складно відстежувати через їх складну геометричну форму та використання композитних матеріалів, таких як склопластик, а також структурних елементів і дерева та пластикової піни. Крім того, лопаті вітрових турбін складаються із багатошарових матеріалів з різною товщиною та анізотропними властивостями. Тому для контролю їх технічного стану застосовують неруйнівні методи як на стадії виробництва, так і під час їх експлуатації. Використовують переважно візуальний, ультразвуковий, радіографічний, термографічний, електромагнітний, акустичний та шерографічний методи НК.

У таблиці наведено огляд основних методів НК, які прямо чи опосередковано застосовують для контролю лопатей вітрової турбіни.

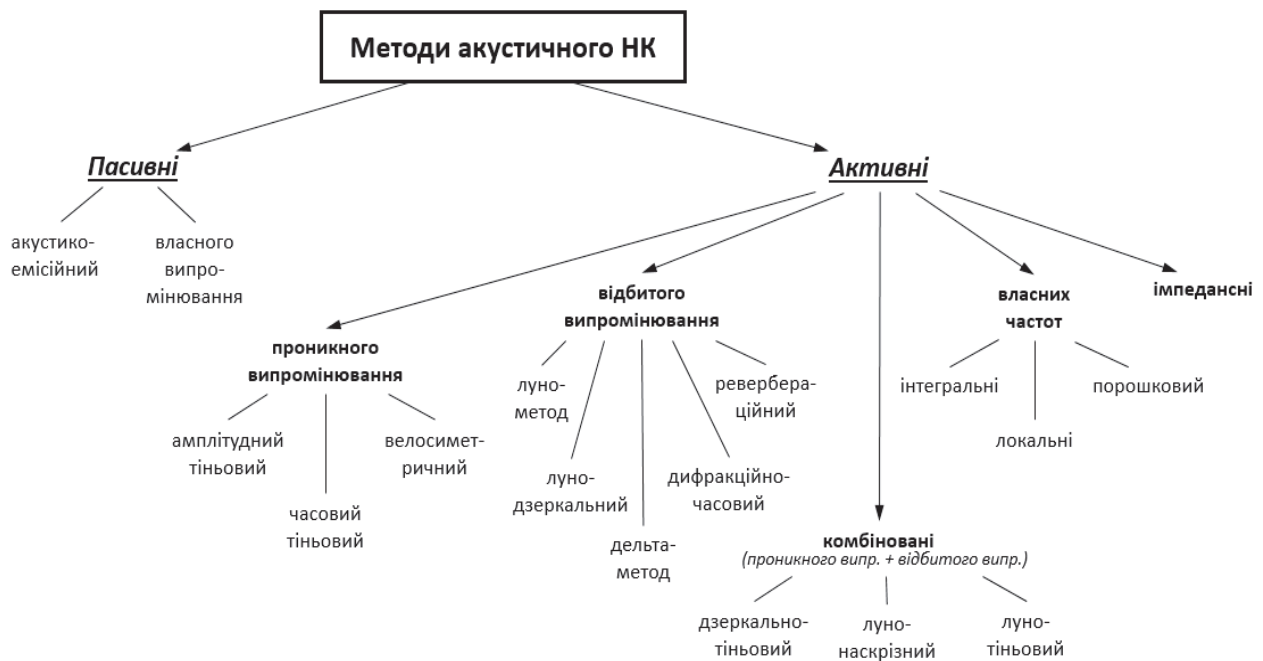


Рис. 1. Класифікація методів акустичного НК / Classification of acoustic non-destructive testing methods

Табл. Основні методи НК лопатей вітрових турбін / The key methods of wind blades non-destructive control

Джерело	Метод НК	Назва методу	Перевага	Недолік
1	2	3	4	5
[17]	Візуальний	Система візуального тестування, основана на системі панорування та масштабування	Здатна виявити тріщини завдовжки 2 см на відстані 200 м	Виявляє лише поверхневі дефекти
[18]	Візуальний	Багатокамерна вимірвальна система із використанням динамічного зшивання просторових даних	Не використовує дорогі датчики	Не перевіряє усю поверхню лопаті вітрової турбіни. Для збільшення точності методу необхідно використовувати більше ніж дві пари камер
[19]	Візуальний	Зображення з безпілотного літального апарата (БПЛА) з додатковими фотограмметричними даними для візуальної реконструкції лопатей вітрових турбін та їхнього стану	Верифікований для ідентифікації та локалізації тріщин лопатей вітрових турбін	Необхідно збільшувати точність
[20]	Ультразвуковий	Система автоматичного позиціонування ультразвукового контролю	Визначає координати і відстань у реальному часі	Потрібні світлодіоди, лінзи, мікропроцесор, оптичні давачі тощо
[21, 22]	Ультразвуковий	Адаптивний аналіз часу проходження безконтактних лазерних ультразвукових сигналів	Швидко визначає розшарування на лопатях вітрових турбін	Метод потребує двох рівнів сканування
[23]	Ультразвуковий	Постоброблення ультразвукових сигналів для аналізу несправностей за допомогою спрямованих хвиль	Методи оброблення сигналів підходять для удосконалення аналізу несправностей	Доступ лише до однієї сторони лопаті
[24]	Термографічний	Аналіз за допомогою перехідної активної термографії набору зразків	Термографія є ефективним методом виявлення дефектів у композитних матеріалах, безконтактним, легким у застосуванні та швидким	Метод обмежується глибиною, розмірами та видом дефектів. Спричиняє спотворення теплового потоку дослідного зразка
[25]	Термографічний	Безперервна лінійна лазерна термографія для візуалізації пошкоджень лопатей вітрової турбіни, що обертається	Запропонований метод забезпечує швидку та безконтактну візуалізацію пошкоджень у реальному часі, автоматично та в стані обертання	Запропоновано пришвидшити огляд та покращити оцінку глибини пошкоджень

1	2	3	4	5
[26]	Радіографічний	Рентгенівська комп'ютерна томографія полімерних композитів	Скорочений час збирання даних та покращена просторова роздільна здатність	Низька роздільна здатність
[27]	Радіографічний	Адаптовані ультразвукові та рентгенографічні методи	Рентгенографічні методи ефективно виявляють структурні дефекти в лопатях вітрових турбін	Кращі результати забезпечує поєднання рентгенографічних і ультразвукових методів
[28]	Електромагнітний	Електромагнітні хвилеводи для виявлення несправностей за допомогою числового та експериментального аналізу	Виявляє тріщини	Перпендикулярно орієнтовану тріщину легше виявити, ніж розташовану коаксіально до напрямку поширення хвилі
[29]	Електромагнітний	Радарна система візуалізації для перевірки лопатей вітрових турбін під час експлуатації	Радарні системи спроможні відстежувати лопаті вітрових турбін у реальному часі	У майбутньому необхідно перевірити на інших типах пошкоджень, наприклад, відшарування
[30]	Акустичний та ультразвуковий	Оброблення сигналів для виявлення пошкоджень та визначення їхніх розмірів за допомогою електромагнітних акустичних перетворювачів	Результати показали високу точність	Необхідно перевірити на реальних даних
[31]	Акустичний та ультразвуковий	Підхід на основі розпізнавання образів для вивчення втоми лопатей вітрових турбін	Сигнали акустичної емісії містять інформацію про пошкодження у композитних матеріалах	Потрібно підвищити точність
[32]	Акустичний та ультразвуковий	Виявлення підповерхневих пошкоджень за допомогою акустичної емісії та гауссівських моделей	Виявлення пошкоджень за мінливих умов експлуатації та середовища	Вимірювання акустичної емісії залежить від навантаження, температури та мастила
[33]	Шерографічний	Автоматизована система шерографії для контролю циліндричних поверхонь	Може ідентифікувати дефекти з'єднання на циліндричній поверхні. Автоматизована перевірка ефективніша та точніша, ніж ручна	Для покращення автоматичного розпізнавання необхідний комплексний навчальний пакет
[34]	Шерографічний	Цифрова шерографія	Проста конфігурація та низька чутливість до впливів зовнішнього середовища	Фазова карта з великою кількістю шуму знижує точність виявлення дефектів

Важливо зазначити, що інформаційні технології є невід'ємною частиною сучасних методів НК. Одним із яскравих прикладів є візуальний (оптичний) метод НК з використанням БПЛА та відповідного програмного забезпечення. У праці [19] наведено реалізацію віддаленого фотограмметричного контролю лопатей вітрових турбін за допомогою БПЛА. Апарат, обладнаний камерою, спіральною траєкторією переміщується навколо досліджуваного об'єкта та фотографує його поверхню. Автономний політ, що також передбачає зліт і посадку, керується лінійним ПІД-контролером (proportional-integral-derivative controller), який є порівняно простим. На основі отриманих зображень вдалося відтворити тривимірну модель вітрової турбіни. Вона дає змогу зафіксувати дрібні елементи на поверхні лопатей. Експерименти виконано за 30 та 60 мс часу експозиції та різних умов освітлення. Результати показали, що можливий віддалений фотограмметричний огляд лопатей вітрової турбіни з метою виявлення дефектів, зокрема, тріщин.

На підставі проаналізованих літературних джерел, зокрема, роботи [35] можна зробити певні висновки.

Візуальний огляд не забезпечує високої точності порівняно з іншими методами неруйнівного контролю. Візуальні методи моніторингу лопатей вітрової турбіни істотно ускладнює висота їх встановлення, а також велика площа поверхонь. Для візуального огляду застосовують оптичні камери із високим коефіцієнтом збільшення або цифрові камери з об'єктивами великої фокусної відстані, як правило, вмонтовані у БПЛА. Також важливо зазначити, що візуальний огляд не виявляє внутрішніх дефектів.

Ультразвукові методи є найпоширенішими у неруйнівному контролі стану лопатей вітрової турбіни. Вони демонструють високу надійність і точність у виявленні та діагностиці як зовнішніх, так і внутрішніх дефектів.

Пасивна термографія дає змогу контролювати стан лопатей вітрової турбіни під час її роботи. Цим методом можна аналізувати розподіл тепла, спричинений періодичним навантаженням та наявністю дефектів. Активна термографія потребує теплового збудження.

Рентгенографічні методи контролю ґрунтуються на проходженні іонізуючого випромінювання через мате-

ріал та вимірювання його ослаблення для виявлення дефектів. Ця сім'я методів дає змогу виявити внутрішні дефекти, такі як тріщини, зміни товщини, корозія тощо. Такі методи можна використовувати у двовимірному або тривимірному томографічному режимі.

Електромагнітне тестування – безконтактний метод з високою роздільною здатністю, широкоживаний для виявлення дефектів у металевих компонентах.

Акустична емісія дає змогу виявити та ідентифікувати пошкодження на лопатях вітрової турбіни. Багато досліджень підтвердило ефективність цього методу.

Шерографія здатна виявити деформацію поверхні. Ефективність методу залежить від розміру та розташування дефектів. Застосування цієї техніки стає все популярнішим завдяки технологічним досягненням у виробництві відеокамер, лазерних сенсорів та іншого відповідного обладнання.

Огляд підходу до неруйнівного контролю вітрових електричних станцій із використанням машинного навчання. У роботі [36] запропоновано цікавий підхід до моніторингу пошкодженості лопатей вітрових турбін, що ґрунтується на використанні методу машинного навчання на основі гауссівських процесів для прогнозування власних частот коливань однієї лопаті за статистичними даними розподілу власних частот коливання сусідніх лопатей та температури навколишнього середовища.

Загалом, основою для цього підходу є зміна власних частот коливання лопатей вітрових турбін під час утво-

рення дефекту, зокрема, тріщини. Дослідження [38] показало, що відцентровий ефект збільшує значення власних частот під час обертання, натомість наявність тріщини у лопаті вітрової турбіни призводить до їх зниження через зменшення жорсткості. Встановлено, що власні частоти зменшуються зі збільшенням розміру тріщини. Вплив тріщин на власні частоти виявився істотнішим за більшої швидкості обертання турбіни. На низьких швидкостях він менш помітний. Також проаналізовано вплив місця розташування дефектів на власні частоти лопаті. Тріщина, розташована на ділянці від 70 % до 80 % довжини лопаті, більше впливає на значення власних частот. Встановлено: якщо не враховувати відцентровий ефект під час обертання лопаті на підвищення її жорсткості, який експериментально виявлено на швидкостях від 7,5 рад/с, тоді зміни власних частот не відобразатимуть коректно наявності тріщин.

На рис. 2 наведено загальну схему цієї методики, яка складається з чотирьох етапів: збирання даних, попереднє оброблення, машинне навчання та діагностика.

Збирання даних виконано за допомогою SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – системи, яка отримує дані від давачів, встановлених на вітрової турбіні, й надсилає їх до центрального комп'ютера для моніторингу і контролю. Вхідними параметрами вибрано перші власні частоти коливань кожної лопаті у напрямку її ребра, температуру навколишнього середовища, вихідну потужність, швидкість обертання турбіни та кут нахилу лопатей. Перед збереженням даних у систему SCADA сигнали дискретизуються з частотою 10 Гц.

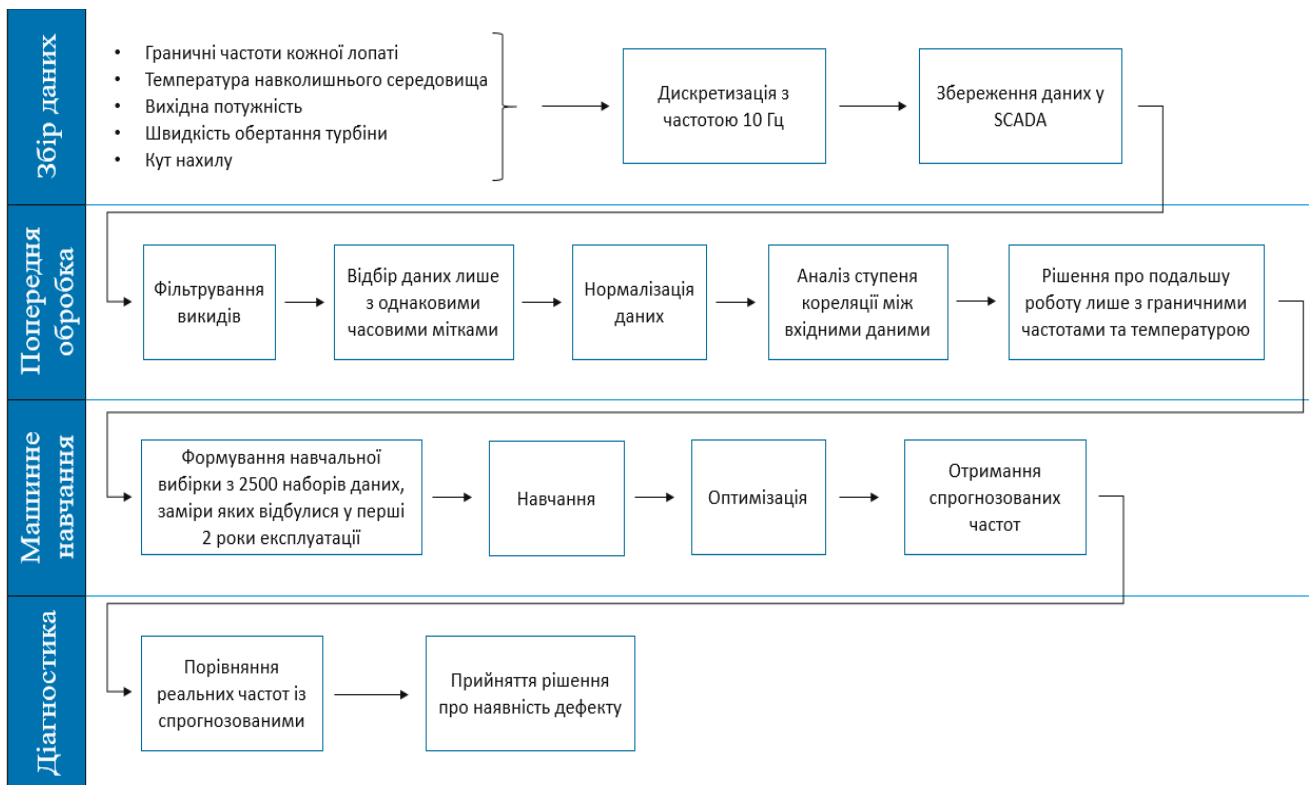


Рис. 2. Загальна схема методики моніторингу пошкодженості лопатей вітрових турбін з використанням машинного навчання / The general scheme of the methodology for wind turbine blades damage monitoring using machine learning

На етапі попереднього оброблення даних виконано фільтрування викидів – значень, які істотно відхиляються від середніх і спричинені стрибками напруги, електронними шумами та завадами, різкими змінами у навколишньому середовищі тощо. Також зауважимо, що оскільки дані зберігають в окремі канали для кожної лопаті паралельно, виникає проблема синхронізації. Щоб спростити модель для подальшого оброблення, вирішили використовувати лише набори вимірів з однаковими часовими мітками.

Наступним кроком на етапі попереднього оброблення є нормалізація даних. Вона виконується з метою підготовки даних до етапу машинного навчання, а також унеможливує розголошення конфіденційних абсолютних значень інформаційних параметрів лопатей вітрових турбін.

Кореляція між власними частотами нових робочих лопатей очевидна, погіршується з часом експлуатації та зникає у разі утворення дефекту. Також досліджено кореляцію між іншими вхідними параметрами. Виявлено помітну залежність між температурою навколишнього середовища та власною частотою коливання лопаті. Тому лише ці характеристики вибрано для подальших досліджень.

Етап машинного навчання складається із трьох фаз: навчання, оптимізація та прогнозування за допомогою процесу Гауса. Для навчальної вибірки важливо вибирати лише ті дані, які характеризують лопаті у нормальному (здоровому) стані. Тому ми вирішили взяти 2500 випадкових наборів, рівномірно розподілених на проміжку перших двох років функціонування турбіни, відповідно припустивши, що протягом цього часу лопаті не мали дефектів. На основі даних частот однієї з лопатей, об'єднаних з даними щодо температури навколишнього середовища, сформовано матрицю вхідних даних для навчання. Частоти іншої лопаті та відповідні вимірювання температури навколишнього середовища утворюють вихідні дані. Такі набори використано для навчання гіперпараметрів за допомогою методу Нелдера – Міда [37]. Також важливо зазначити, що обмеження у 2500 наборів введено через обчислювальну складність навчання, що становить $O(N^3)$ [39].

На етапі моніторингу здійснюють регулярні вимірювання власних частот коливань для кожної лопаті та порівнюють зі спрогнозованими значеннями. Якщо середнє значення модуля різниці між спрогнозованими та реальними даними перевищує три середньостатистичні відхилення σ , є підстави припустити, що лопатка містить дефект, зупинити турбіну та викликати спеціалістів з технічного обслуговування для подальшої перевірки.

Результати випробувань продемонстрували успішність упровадження цього методу. За його допомогою виявлено критичні пошкодження лопатей, що дало змогу запобігти аварійній ситуації.

Обговорення результатів дослідження. Будь-яка несправність лопатей вітрової турбіни призводить до значних простоїв, витрат і втрат виробництва енергії. Сьогодні розробляють нові системи моніторингу стану для неруйнівного контролю лопатей вітрових турбін. Узагальнивши та проаналізувавши досягнення в цій галузі за останній час, ми встановили, що такі системи

грунтуються переважно на візуальних, ультразвукових, термографічних, радіографічних, електромагнітних, акустично-емісійних, акустико-ультразвукових, шерографічних та інших неруйнівних методах.

Наступним перспективним напрямом дослідження є вдосконалення описаних підходів до моніторингу технічного стану основних елементів вітрогенераторів та розроблення нових з використанням сучасних інформаційних технологій.

Отже, за результатами роботи, можна сформулювати наукову новизну і практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – розвинено класифікацію акустичних методів неруйнівного контролю лопатей вітрових турбін з використанням інформаційних технологій.

Практична значущість результатів дослідження – систематизовано методи та види НК та оцінено сучасні методи НК лопатей вітрових турбін.

Висновок / Conclusions

У межах статті проаналізовано та систематизовано теоретичні та практичні здобутки застосувань основних методів НК для моніторингу лопатей вітрових турбін.

На основі наведеної загальної класифікації видів дефектів лопатей вітрових турбін можна стверджувати, що найнебезпечнішими з погляду передбачуваного руйнування є тріщиноподібні дефекти.

Виконавши аналіз основних видів і методів НК, потрібно виділити акустичні методи як одні із найефективніших та перспективних підходів, що стрімко розвиваються у сфері моніторингу пошкодженості лопатей вітрових турбін.

Переважає більшість сучасних методів НК передбачає використання інформаційних технологій, розробок відповідного програмного й апаратного забезпечення. Зокрема, яскравим прикладом є використання БПЛА для візуального моніторингу технічного стану лопатей. Також продемонстровано ефективність підходу до неруйнівного контролю вітрових електричних станцій із використанням машинного навчання, що є, безумовно, перспективним для створення нових високоточних методів виявлення небезпечних дефектів у матеріалі лопаті на ранніх стадіях їх розвитку.

References

- [1] Rudavskiy, D. V. (2011). Residual resource of metal structural elements in Hydrogen-containing environments. Kyiv: Naukova dumka (in Ukrainian).
- [2] Andreykiv, O. Y., Pustovyi, V. M., Rudavskiy, D. V., Dolinska, I. Y., Semenov, P. O. (2017). Methods of assessing residual strength and durability of structural elements based on non-destructive testing data: Handbook. Lviv: Prostir-M (in Ukrainian).
- [3] Nazarchuk, Z. T., Koshoviy, V. V., Skalsky, V. R., edited by Panasyuk, V. V. (2001). Fracture mechanics and strength of materials: Handbook. Vol. 5: Non-destructive testing and technical diagnostics. Lviv FMI (in Ukrainian).
- [4] Klyuev, V. V., Sosnin, F. R., Filippov, V. N., edited by Klyuev, V. V. (1996). Mechanical engineering: Encyclopedia. Vol. 3: Measurements, control and diagnostics. Mashinostroenie (in Russian).
- [5] Klyuev, V. V., Sosnin, F. R., Filippov V. N., edited by Klyuev, V. V. (1995). Non-destructive testing and diagnostics: Handbook. Mashinostroenie (in Russian).

- [6] Aleshyn, N. P., Shcherbinskyi, V. G. (1991). Radiographic, ultrasonic and magnetic defectoscopy of metal products: Textbook for vocational schools. Vysshaya shkola [in Russian].
- [7] Ermolov, I. N., Ostanin, Y. Y. (1988). Methods and tools of non-destructive quality control: Textbook for engineering and technical specialized universities. Vysshaya Shkola (in Russian).
- [8] Gurvich, A. K., Dovnar, B. P., Kozlov, V. B.; edited by Gurvich A. K. (1983). Non-destructive inspection of rails during operation and repair. Transport (in Russian).
- [9] Shcherbinsky V. G., Feoktistov, V. A., Polevik, V. A.; Edited by Shcherbinsky, V. G. (1987). Methods of defectoscopy of welded joints. Mashinostroenie (in Russian).
- [10] Goncharov, I. B., Matangin, K. M. (1990). Equipment defectoscopy in the coal industry: Reference guide. Nedra (in Russian).
- [11] State Standard of Ukraine. DSTU 2865-94. Non-destructive testing. Terms and Definitions. (1995).
- [12] Zolotarev, S., Vengrinovich, V., Tillack, G.-R. (1998). Finite series expansion method modified for multi-step reconstruction from limited number of projections and views // 2nd Int. Conf. on Computer Methods and Inverse Problems in Non-destructive Testing and Diagnostics, Minsk, 20–23 Oct. 1998: Proc. – Berlin: DGZFP.
- [13] Andreykiv, A. E., Lysak, N. V. (1989) Acoustic emission method in the study of destruction processes. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- [14] Nazarchuk, Z. T., Skalsky, V. R. (2009). Acoustic emission diagnostics of structural elements: scientific and technical manual: In 3 volumes – Volume 1: Theoretical foundations of the acoustic emission method. Naukova Dumka (n Ukrainian).
- [15] Paton, B. E., Lobanov, L. M., Nedoseka, A. Y. (2003). Technical diagnostics: yesterday, today, and tomorrow. Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing, 4, 6–10.
- [16] Nedoseka, A. Y. (2005). Control of critical stress state using the acoustic emission method. *In the World of Non-Destructive Testing*, 1(27), 14–16.
- [17] Kim, D. Y., Kim, H.-B., Jung, W. S., Lim, S., Hwang, J.-H., Park, C.-W. (2013). Visual testing system for the damaged area detection of wind power plant blade, IEEE ISR 2013, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISR.2013.6695675>
- [18] Poozesh, P., Baqersad, J., Niezrecki, C., Avitabile, P., Harvey, E., Yarala, R. (2017). Large-area photogrammetry based testing of wind turbine blades. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 86, 98–115. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.07.021>
- [19] Zhang, D., Burnham, K., Mcdonald, L., Macleod, C., Dobie, G., Summan, R., Pierce, G. (2017). Remote inspection of wind turbine blades using UAV with photogrammetry payload. 56th Annual British Conference of Non-Destructive Testing-NDT 2017.
- [20] Ren, Y., Qu, F., Liu, J., Feng, J., Li, X. (2017). A universal modeling approach for wind turbine condition monitoring based on scada data. 6th Data Driven Control and Learning Systems (DDCLS), 265–269. <https://doi.org/10.1109/DDCLS.2017.8068080>
- [21] Larrañaga-Valsero, B., Smith, R.A., Tayong, R.B., Fernández-López, A., Güemes, A. (2018). Wrinkle measurement in glass-carbon hybrid laminates comparing ultrasonic techniques: A case study. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 114, 225–240. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.08.014>
- [22] Tiwari, K. A., Raisutis, R., Samaitis, V. (2017). Hybrid signal processing technique to improve the defect estimation in ultrasonic non-destructive testing of composite structures. *Sensors*, 17, 1–21. <https://doi.org/10.3390/s17122858>
- [23] Tiwari, K.A., Raisutis, R. (2018). Post-processing of ultrasonic signals for the analysis of defects in wind turbine blade using guided waves. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 53, 546–555. <http://dx.doi.org/10.1177/0309324718772668>
- [24] Lizaranzu, M., Lario, A., Chiminelli, A., Amenabar, I. (2015). Non-destructive testing of composite materials by means of active thermography-based tools. *Infrared Physics & Technology*, 71, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2015.02.006>
- [25] Hwang, S., An, Y.-K., Sohn, H. (2017). Continuous line laser thermography for damage imaging of rotating wind turbine blades. *Procedia Engineering*, 188, 225–232. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.478>
- [26] Garcea, S. C., Wang, Y., Withers, P. J. (2018). X-ray computed tomography of polymer composites. *Composites Science and Technology*, 156, 305–319. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.10.023>
- [27] Jasinien, E., Raiutis, R., Voleiis, A., Vladiuskas, A., Mitchard, D., Amos, M. (2019). NDT of wind turbine blades using adapted ultrasonic and radiographic techniques. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 51, 477–483. <https://doi.org/10.1784/insi.2009.51.9.477>
- [28] Mikkelsen, L. P. (2019). Visualizing composite materials for wind turbine blades using x-ray tomography. Abstract from Materials for Tomorrow.
- [29] Moll, J., Simon, J., Malzer, M., Krozer, V., Pozdniakov, D., Salman, R., Durr, M., Feulner, M., Nuber, A., Friedmann, H. (2018). Radar imaging system for in-service wind turbine blades inspections: Initial results from a field installation at a 2 mw wind turbine. *Progress In Electromagnetics Research*, 162, 51–60. <http://dx.doi.org/10.2528/PIER18021905>
- [30] Gómez, C., García, F., Arcos, A., Cheng, L., Kogia, M., Mohimi, A., Papaalias, M. (2017). A heuristic method for detecting and locating faults employing electromagnetic acoustic transducers. *Eksplotacja i Niezawodność 2017*, 19. <https://doi.org/10.17531/ein.2017.4.1>
- [31] Tang, J., Soua, S., Mares, C., Gan, T.-H. (2017). A pattern recognition approach to acoustic emission data originating from fatigue of wind turbine blades. *Sensors*, 17, 2507. <https://doi.org/10.3390/s17112507>
- [32] Fuentes, R., Dwyer-Joyce, R., Marshall, M., Wheals, J., Cross, E. (2020). Detection of sub-surface damage in wind turbine bearings using acoustic emissions and probabilistic modelling. *Renewable Energy*, 147, 776–797. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.019>
- [33] Ye, Y., Ma, K., Zhou, H., Arola, D., Zhang, D. (2019). An automated shearography system for cylindrical surface inspection. *Measurement*, 135, 400–405. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.11.085>
- [34] Zhao, Q., Dan, X., Sun, F., Wang, Y., Wu, S., Yang, L. (2018). Digital shearography for NDT: Phase measurement technique and recent developments. *Applied Sciences*, 8, 2662. <https://doi.org/10.3390/app8122662>
- [35] Márquez, F.P.G., Chacón, A.- M. (2020). A Review of Non-Destructive Testing on Wind Turbines Blades. *Renewable Energy*, 161, 998–1010. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.145>
- [36] Chandrasekhar, K., Stevanovic, N., Cross, E. J., Dervilis, N., Worden, K. (2021). Damage detection in operational wind turbine blades using a new approach based on machine learning. *Renewable energy*, 168, 1249–1264. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.119>
- [37] Nelder, J. A., Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *The computer journal*, 7(4), 308–313. <http://dx.doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>
- [38] Eldeeb, A. E., El-Arabi, M. E., Hussein, B. A. (2020). Effect of cracks in wind turbine blades on natural frequencies during operation. *Journal of engineering and applied science*, 67, 1995–2012.
- [39] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., Stein, C. (2002). Introduction to algorithms. Second edition. McGraw-Hill Book Company.

THE MODERN STATE OF APPROACHES TO MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF WIND TURBINE BLADES USING INFORMATION TECHNOLOGIES

Nowadays wind energy is one of the most important and promising sources of environmentally clean renewable energy. Wind turbine blades are among the most expensive components. Depending on the size, their manufacturing costs range between 10 % and 20 % of total manufacturing costs. Moreover, the size of blades has increased in recent years, leading to greater efficiency and energy production, but presenting higher failure probability. It is extremely important to avoid critical blade failures, because when damaged blades liberate, they have the potential to damage not only the turbines they were attached to, but also other turbines in their vicinity. In order to increase the reliability and safety of wind turbine operation, as well as to reduce costs due to maintenance and downtime in a non-working state, it is necessary to apply modern methods of monitoring the condition of large-sized and highly loaded parts of wind power plants using information technologies. The main types of defects and their classification are considered. The influence of the rotation speed of the turbine and the presence of a damage in the blade on the oscillation natural frequencies was analyzed. The main types and methods of non-destructive testing (NDT) are presented. The acoustic method is considered in detail, as it is rapidly developing and is promising for the field of green energy. The classification of acoustic methods of NDT is provided based on the studied literature. An analytical review of publications considering NDT methods for diagnosing wind turbine blades, including the ones which use unmanned aerial vehicles (UAVs), was conducted. The advantages and disadvantages of each method are shown. The analysis of NDT approach of wind power plants using machine learning based on Gaussian processes to predict natural frequencies of one blade based on the statistical data of the distribution of natural frequencies of neighboring blades and ambient temperature was carried out. The description of the full cycle of the system's functioning, from data collection to decision-making about the possible presence of a defect in the structure, is provided. This paper has summarized and analyzed the most important advances done in the field of NDT in the last few years. The considered approaches can serve as a basis for building new highly reliable methods for detecting dangerous defects in the blade material at the early stages of their development.

Keywords: renewable energy; methods of non-destructive testing; acoustic NDT; machine learning; UAV.

Інформація про авторів:

Басалкевич Олександр Андрійович, аспірант, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: oleksandr.a.basalkevych@lpnu.ua; <https://orcid.org/0009-0001-3049-9901>

Рудавський Денис Володимирович, д-р техн. наук, професор, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: denys.v.rudavskyt@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-5541-3003>

Цитування за ДСТУ: Басалкевич О. А., Рудавський Д. В. Сучасний стан підходів до моніторингу технічного стану лопатей вітрових турбін з використанням інформаційних технологій. *Український журнал інформаційних технологій*. 2023. Т. 5, № 2. С. 79–87.

Citation APA: Basalkevych, O. A., & Rudavskiy, D. V. (2023). The modern state of approaches to monitoring the technical condition of wind turbine blades using information technologies. *Ukrainian Journal of Information Technology*, 5(2), 79–87.

<https://doi.org/10.23939/ujit2023.02.079>