

ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ПРИ ПРОВЕДЕННІ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ МАШИН

Національний авіаційний університет

sap@nau.edu.ua

Вступ

Найважливішим напрямом приладобудування, що визначає прогрес техніки, є розвиток та вдосконалення підвищення достовірності та інформативності в оцінці наявності пошкоджень складних конструкцій, визначення моменту появи дефекту та його розташування.

Належний своєчасний огляд та ремонт обладнання дозволяє на ранніх стадіях визначати і вирішувати проблеми задля збільшення терміну експлуатації та підвищення надійності роботи різноманітного технічного устаткування. Цього можна досягнути шляхом діагностики обладнання для визначення несправності або потенційної несправності, такої як дисбаланс, знос, неспіввісність, несправність підшипника, фрикційне обертання та розтріскування зубів у зубчастому зачепленні [1].

Найбільш популярними методами діагностики є аналіз акустичних та вібраційних сигналів, оскільки багато несправностей може бути виявлено без зупинки обладнання, а тим більше без його розборки. Аналіз акустичних сигналів має переваги для короткочасних перевірок. Моніторинг обладнання в режимі реального часу можна досягти за допомогою аналізу сигналів вібрації. Аналіз вібрації вважається найкращим методом визначення стану машини [2]. Кожен з методів має ряд переваг і недоліків. Широкого поширення знайшли методи оцінки технічного стану виробів за параметрами вібрацій. На їх основі створені контрольні прилади та стенди для діагностування, в основному, машин і механізмів, що мають частини, що обертаються. [3].

Отже, машини та обладнання, що складаються з рухомих частин генерують небажану вібрацію, виконуючи аналіз вібрації стає можливим приймати рішення про те, чи обладнання справне і може продовжувати працювати або необхідно проводити ремонт [2].

Стан машини можна визначити за амплітудою та частотою вібрації, оскільки обидва ці параметри можуть нести інформацію та дають можливість виявити наскільки серйозна проблема та виявити джерело [4]. Вібраційний аналіз, що базується на спектральному аналізі реального часу, можна розділити на часову, частотну та часово-частотну область [5]. Аналіз часової та частотної областей аналізує часові ряди даних відповідно до часу та частоти. Аналіз частотно-часової області використовував одночасно часову та частотну області [6].

Постановка завдання

Аналіз вібрації при проведенні моніторингу та діагностики машини зазвичай складається з трьох основних кроків, які включають збір даних, обробку сигналу та розпізнавання несправностей. На сьогоднішній день існує багато технік та інструментів, які можна використовувати на кожному з вищезгаданих кроків, та вибрати правильний з них може бути досить складною задачею. Це пояснюється тим, що кожен метод та інструмент мають свої характеристики, переваги та недоліки. Ці методи можна розділити на дві основні групи, які базуються на моделях і на основі даних. Методи, засновані на моделі, вимагають аналітичної моделі системи, тоді як методи, керовані даними, не потребують жодних припущень щодо моделі системи.

У методах, керованих даними, застосовуються передові методи обробки сигналів. Оскільки дуже важко змоделювати несправну систему. Методи, керовані даними, широко застосовуються в діагностиці та моніторингу машин у порівнянні з методами, заснованими на моделях.

Метою роботи є огляд різних методів аналізу вібрації на основі даних та інструментів, які використовуються для моніторингу та діагностики машин.

Основна частина

Першочергово необхідно провести роботу зі збору даних, є два інструменти, які мають вирішальне значення на етапі збору даних: аналізатор і датчик. Вібраційні аналізатори можна розділити на два типи: автономний і комп'ютерний, тоді як в якості датчика вібрації може бути акселерометр, датчик швидкості, датчик переміщення та лазерний доплерівський віброметр (LDV). Крім того, акселерометри можна розділити на п'єзоелектричні і мікроелектромеханічні акселерометри (MEMS).

В свою чергу, аналізатор – це інструмент, який використовується для аналізу даних про вібрацію. Він складається з датчика, підсилювача, фільтра та аналого-цифрового перетворювача. Сигнал від датчика вібрації проходить через підсилювач для збільшення роздільної здатності та співвідношення сигнал/шум. Після чого посилений сигнал проходить через фільтр, щоб на етапі оцифровки не виникало накладення. Сигнал оцифровується в аналого-цифровому перетворювачі, а потім проходить через блок обробки, де його можна відобразити або обробити для отримання частотного спектру [5,7]. Віброаналізатори можна розділити на звичайні і комп'ютерні. Звичайний вібраційний аналізатор – це окремий пристрій, спеціально створений для вібрації. Це складний і дорогий інструмент, яким зазвичай користуються фахівці з вібрації. Цей інструмент може допомогти користувачеві визначити наявність проблеми, а також її основну причину та час виходу машини з ладу. На ринку доступні одно-, дво- та чотириканальні аналізатори. Одноканальний аналі-

затор може отримувати вхідні дані лише від одного акселерометра за раз, тоді як двоканальний аналізатор може отримувати вхідні дані від двох різно розташованих акселерометрів одночасно [8]. Чотириканальний аналізатор може приймати вхідні дані від кількох датчиків і може одночасно вимірювати горизонтальне, вертикальне, осьове та виявлення орієнтації на ранніх стадіях. Зазвичай він використовується з тривісним акселерометром. Ще одна дешевша альтернатива – ручний вібромір. Цей акумуляторний пристрій оснащений акселерометром і забезпечує відображення рівнів вібрації при контакті з механізмами [8]. Але його вимірювальні можливості є дещо обмеженими та недостатніми для зберігання даних.

Комп'ютерний вібраційний аналізатор – це новий інструмент, де дані про вібрацію можна обробляти віртуально за допомогою спеціального програмного забезпечення та персонального комп'ютера. Цей метод набув популярності, оскільки він простий, недорогий і легко ремонтується, а також може виконувати більшість функцій, доступних у звичайному аналізаторі вібрації, наприклад осцилограф, мултиметр і генератор сигналів. LabVIEW є широко використовуваною мовою програмування в цьому методі завдяки численним масивам карт збору даних і підтримуваним ним систем вимірювання [9].

Датчик або перетворювач – це пристрій, який перетворює механічні сигнали в електричні [10]. Тип використовуваних датчиків зазвичай залежить від діапазону частот, чутливості, конструкції та експлуатаційних обмежень. Незалежно від того, який тип датчиків використовується, чим жорсткіше кріплення датчика, тим вище діапазон частот і точність його зчитування [11]. У аналізі вібрації є три широко використовувані датчики для отримання вібраційного сигналу. Такими датчиками є акселерометр, датчик швидкості та переміщення.

Акселерометр – це пристрій, який використовується для вимірювання вібрації або прискорення. Механізм роботи

полягає в тому, що коли п'єзоелектричний матеріал в акселерометрі піддається дії сили, він виробляє заряд, відповідний прикладеній силі. Оскільки сила прямо пропорційна прискоренню, будь-яка зміна цього фактора призведе до зміни виробленого заряду, який потім посилюється [11]. Одноосовий акселерометр може виявити рух тільки в одній площині, тоді як тривісний акселерометр охоплює всі три виміри. У порівнянні з одновісним акселерометром, тривісний акселерометр має більший обсяг пам'яті, але набагато дорожчий [12]. Акселерометр є широко використовуваним датчиком завдяки своїй надійності, простоті та надійності. Крім того, його можна розділити на п'єзоелектричний і MEMS-акселерометр. П'єзоелектричний акселерометр покладається на п'єзоелектричний ефект кварцових або керамічних кристалів, які зазвичай попередньо завантажено, щоб генерувати електричний вихід, пропорційний прикладеному прискоренню. Зміни виробленого заряду залежать від цього прискорення [13,14]. П'єзоелектричний акселерометр має ряд переваг, таких як кращий частотний і динамічний діапазон, легкість і висока чутливість. Однак він вразливий до впливу зовнішнього середовища [15]. Він також вимагає електронної інтеграції для отримання даних про швидкість і переміщення, оскільки він зв'язаний із змінним струмом [15].

MEMS-акселерометр, як правило, складається з рухомої опорної маси з пластинами, підкріпленої механічною системою підвіски до рами [16]. Коли вона піддається прискоренню, опорна маса має тенденцію чинити опір руху через власну інерцію, і тому пружина розтягується або стискається. В результаті створюється сила, що відповідає прикладеному прискоренню. MEMS-акселерометр має постійний струм і дуже підходить для вимірювання низькочастотної вібрації та прискорення. Він вимагає низької потужності обробки та забезпечує чудову чутливість [16]. Сучасний MEMS акселерометр забезпечує досить хорошу якість даних до

кількох десятків кГц. Недоліком є погане співвідношення сигнал/шум.

Датчик швидкості вимірює напругу, яку створює відносний рух об'єкта, зазвичай в одиницях м/с або см/с. Він працює на основі концепції електромагнітної індукції і може працювати без будь-якого зовнішнього пристрою [17]. Оскільки поверхня, на якій встановлений датчик, вібрує, рух магніту в котушці вироблятиме напругу, пропорційну швидкості вібрації [18]. Цей сигнал напруги представляє створену вібрацію і потім подається на лічильник або аналізатор [11]. Як правило, перетворювач швидкості коштує дешевше, ніж інші датчики, а в поєднанні з його легкою установкою, він сприятливий для контролю вібрації обертових машин. Однак він великий, важкий, і більшість перетворювачів швидкості схильні до проблем з надійністю при робочих температурах, що перевищують 121°C [15,19].

Датчик переміщення, який іноді називають вихровим струмом або датчиком наближення, вимірює як відносну вібрацію, так і положення вала. Одиниця переміщення може бути в м, см або мм. Зазвичай він використовується для вимірювання низькочастотної вібрації менше 10 Гц, але він також може вимірювати вібрацію до 300 Гц [17]. Однак вони не найкращі у вимірюванні вигину валу від місця розташування зонда [19]. Проблеми з дисбалансом і зміщенням – це типи проблем, які можуть бути виявлені датчиком переміщення. Для вимірюваних частот вібрації вище 1 кГц амплітуда зазвичай втрачається на рівні шуму [19]. Він має переваги хорошого динамічного діапазону в певному діапазоні частот, розумну чутливість і просту схему постобробки з незначним обслуговуванням. Однак його важко встановити, він сприйнятливий до ударів, а деякі традиційні датчики переміщення не відкалібровані для невідомих металевих матеріалів [15].

Методи обробки сигналу

Найпростіший аналіз вібрації для діагностики складових машинного обладнання використовується для аналізу

вимірюваного вібраційного сигналу у часовій області. Отримані вібраційні сигнали являють собою серію значень, що представляють переміщення, швидкість і прискорення, а в аналізі часової області амплітуду сигналу наносять на графік залежності від часу. Для отримання важливої інформації із сигналів в часовій області потрібно обирати метод обробки сигналів шляхом перетворення вихідних сигналів у відповідні статистичні параметри, такі як пікове значення, СКВ, крест-фактор і ексцес. Декілька статистичних параметрів зазвичай виділяють із сигналу часової області, щоб можна було вибрати найбільш значущий параметр, який може ефективно розрізняти нормальні та дефектні вібраційні сигнали машинного обладнання [20].

Пік – це максимальне значення сигналу $v(t)$, за вимірний час і може бути визначено як

$$peak = |v(t)|_{\max} \quad (1)$$

При наявності ударів пікові значення вібраційного сигналу будуть змінюватися. За умови несправності пікове значення збільшується. Серйозність і тип несправності можна оцінити на основі амплітуд відповідних піків.

Середньоквадратичне значення більше підходить для застосувань в усталених режимах та аналізу одиначної синусоїди [1]. Середньоквадратичне значення чистої синусоїди дорівнює площі під півхвилюю, яка дорівнює 0,707. Середньоквадратичне значення може бути представлене як

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt} \quad (2)$$

де T – тривалість часу і $v(t)$ – сигнал.

Крест-фактор – це відношення пікового значення вхідного сигналу до середньоквадратичного значення і представлений наступним чином

$$CF = \frac{peak}{RMS} \quad (3)$$

Для синусоїдального сигналу крест-фактор буде дорівнювати $\sqrt{2} = 0.414$, а для нормально розподіленого випадкового

сигналу значення становитиме приблизно 3. Порівняно з піковими та середньоквадратичними значеннями крест-фактор зазвичай використовується, коли вимірювання проводяться з різними швидкостями обертання, оскільки він не залежить від швидкості.

Ексцес – це нерозмірне статистичне вимірювання кількості викидів у розподілі при аналізі вібрації, він відповідає кількості перехідних піків. Велика кількість перехідних піків і високе значення ексцесу можуть свідчити про знос. Ексцес не чутливий до швидкості обертання або навантаження, і його ефективність залежить від наявності значної імпульсивності в сигналі. Функція ексцесу може надати інформацію щодо відсутності Гаусівської залежності або імпульсивності вібраційних сигналів. У програмах моніторингу стану машин ексцес зазвичай є кращим ніж крест-фактор, але останній використовується більш часто. Це пояснюється тим, що вимірювачі, які можуть реєструвати значення крест-фактору, простіші у використанні та доступніші за ціною в порівнянні з вимірювачем ексцесу.

Аналіз частотної області

Більшість реальних сигналів можна розбити на комбінацію унікальних синусоїд. Кожна синусоїда буде виглядати як вертикальна лінія в частотній області, де висота і положення лінії представляють амплітуду і частоту відповідно. При аналізі частотної області амплітуда наноситься на графік проти частоти та порівнюється з часовою областю, і виявлення резонансної частотної складової легше. Розглянемо переваги та недоліки кожного методу.

Перетворення Фур'є (FT) перетворює сигнал $f(t)$ в часовій області в частотну область, генеруючи спектр $F(\omega)$. FT отримаємо за допомогою

$$F(\omega) = Ff(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (4)$$

де ω – частота, а t – час. Його можна перетворити знову у часову область з частотної

області за допомогою оберненого перетворення Фур'є (IFT), отримати як

$$f(t) = F^{-1}(F(\omega)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (5)$$

Швидке перетворення Фур'є (ШПФ) є ефективним і широко застосовуваним алгоритмом для отримання ФТ дискретизованих часових сигналів. Діаграма ШПФ безвідмовних промислових машин складається лише з одного піку, який представляє власну частоту робочої машини. Таким чином, дефект у машині можна ідентифікувати, якщо на графіку присутні інші піки, крім піку власної частоти.

Кепстральний аналіз був розроблений у 1960-х роках і може бути визначений як спектр потужності логарифма спектру потужності [21]. Кепстральний аналіз можна використовувати для виявлення будь-якої періодичності структури в спектрі, наприклад гармонік, бічних смуг або ехо-сигнали. Це дозволяє виявляти такі несправності, як підшипники та локалізовані дефекти зубців, які створюють гармонійно пов'язані частоти низького рівня. Існує чотири типи кепстра: справжній кепстр, складний кепстр, спектр потужності та фазовий спектр, але кепстр потужності є найбільш широко використовуваним кепстром у машинній діагностиці та моніторингу.

Аналіз огинаючої, також відомий як амплітудна демодуляція або демодульований резонансний аналіз, був введений в [22]. Цей метод відокремлює низькочастотний сигнал від фонового шуму. Аналіз огинаючої складається з етапу смугової фільтрації та демодуляції, який виділяє огинаючу сигналу, і його спектр, та можливо, містить потрібну діагностичну інформацію. Він широко використовується в діагностиці підшипників кочення та низькошвидкісних машин і має перевагу раннього виявлення проблем з підшипниками. Завданням цього підходу є визначення найкращої смуги частот для огинаючої. Для безперебійної роботи аналізу

огинаючої потрібен чіткий фільтр і точна специфікація діапазону частот для фільтрації.

Аналіз спектру пов'язаний з ШПФ таким чином, що ШПФ часто використовується в аналізі спектру для перетворення сигналу з часової області в частотну область [23]. Порівняння спектру слід проводити на логарифмічній шкалі амплітуди (дБ), оскільки за змінами на логарифмічній осі можна визначити стан вібрації. Однак доводиться мати справу з невеликими коливаннями від швидкості обертання машини. За допомогою цього методу можна визначити несправність, яка здатна значно змінити вібраційну сигнатуру за короткий період часу [24]. Аналіз спектру – це складний аналіз, який, навіть з огляду на велику кількість доступної літератури, все ще потребує експертних навичок для використання діагностичних можливостей аналізу спектру. У порівнянні з аналізом кепстру, аналіз спектру не дає жодної інформації щодо часової локалізації частотної складової.

Аналіз частотно-часової області

Часова та частотна області інтегруються в аналіз частотно-часової області. Це означає, що частотна складова сигналу та їх зміни в часі можуть бути визначені одночасно під час аналізу. Підходи до аналізу вібрації, згадані раніше, здебільшого покладаються на стаціонарне припущення, що не в змозі виявити локальні особливості у часовій та частотній областях одночасно [25]. Таким чином, такі методи непридатні для нестаціонарного аналізу сигналів. Методи аналізу частотно-часової області включають вейвлет-перетворення, розподілу Вігнера-Вілля, перетворення Гільберта Хуанга, короткочасного перетворення Фур'є і спектральної щільності потужності.

Розпізнавання помилок на основі штучного інтелекту

Застосування штучного інтелекту в аналізі вібрації для моніторингу та діагностики машин стає все більш популярним. Розглянемо кілька методів аналізу вібрації

на основі штучного інтелекту для моніторингу та діагностики машин.

SVM (support-vector machines) є алгоритмом класифікації, що найбільше широко використовується. Цей метод перетворює набір даних у до простору високо-розмірних ознак шляхом нелінійного перетворення, а потім визначає найкращу гіперплощину [1]. Найкраща гіперплощина означає ту з найбільшим запасом між двома класами A і B. Точки даних обох класів, які знаходяться ближче до гіперплощини і впливають на положення та орієнтацію гіперплощини, називають опорними векторами.

NN (neural network) складається з великої кількості багато пов'язаних штучних процесорних нейронів, які називаються вузлами, з'єднаних один з одним в прошарок, що утворюють мережу [26]. NN має можливість моделювати процеси та системи на основі необроблених даних про вібрацію, отриманих із методів частотно-часово-частотної області. На етапі навчання NN кращі входні змінні можуть пригнічувати вплив слабких змінних. Таким чином, дані повинні бути належним чином оброблені та масштабовані перед подачею в NN. Нормалізація вихідних даних вібрації до значень від 0 до 1 може допомогти зменшити вплив входної змінної [27]. Час навчання збільшується відповідно до складності мережі, а це безпосередньо впливає на точність результатів.

У порівнянні зі звичайною логікою, нечітка логіка спрямована на моделювання неточних способів міркування для прийняття раціональних рішень в середовищі невизначеності та неточності [28]. Існує чотири основних етапи системи нечіткої логіки: фазифікація, механізм висновку, основа правил і компонент дефазифікації. Етап фазифікації перетворює входні дані у нечіткі набори, перш ніж етап нечіткого висновку зробить надійний висновок на основі правил, створених на етапі бази правил. Нарешті, стадія дефазифікації дає результати, які можна виміряти. Нечітка логіка пов'язана з функціями належності, роль яких полягає у відображенні

нечітких входних значень у нечіткі лінгвістичні терміни і навпаки. Щоб отримати діагностичну систему з високою чутливістю, правила та функції можна налаштувати [29]. Однак правильно визначити нечіткі правила та оптимізувати функції належності є найбільшою проблемою в нечіткій логіці. Нечітку логіку легше реалізувати в порівнянні з SVM і NN. Крім того, на відміну від інших методів штучного інтелекту, таких як SVM і NN, вона не покладається на набори даних, оскільки в нечіткій логіці немає етапу навчання або тестування. В окремих випадках цей метод може забезпечити лише загальну діагностику, оскільки специфічна ознака несправності машини неможливо визначити регулярно. Однак це єдина доступна альтернатива, коли збір даних про помилки неможливий [30].

GA (genetic algorithm) отриманий на основі дослідження біологічної системи, може вирішувати задачі оптимізації як обмежені, так і необмежені на основі процесу природного відбору [31]. GA зазвичай використовується для оптимізації параметрів системи моніторингу та підвищення швидкості та точності діагностики несправностей.

Висновки

Аналіз вібрації для моніторингу та діагностики машин стає все більш доступним завдяки новим технологіям процесу збору даних та розвитку методів обробки сигналів. У цьому дослідженні ми провели систематичний огляд аналізу сигналів вібрації для моніторингу та діагностики машин, який можна розділити на етапи збору даних, виділення ознак та виявлення несправностей. У ході дослідження визначено, що методи часової та частотної області підходять для стаціонарних сигналів, а методи частотно-часової області переважні для нестаціонарних сигналів та раннього виявлення несправностей. Методи глибокого навчання почали застосовувати в аналізі вібрації для моніторингу та діагностики машин, оскільки вони допомагають звести до мінімуму вимоги до експертних знань на складному етапі отримання

ознак. Традиційні методи штучного інтелекту, такі як SVM, NN і нечітка логіка, як і раніше, вимагають експертних знань на етапі отримання ознак з нових наборів даних. А також визначено, що традиційні функції у часовій області, такі як середньоквадратичне значення та коефіцієнт амплітуди, як і раніше, актуальні і їх застосування зі штучним інтелектом буде продовжувати розширюватися.

Література

1. *Aherwar A., Khalid M.S.* Vibration analysis techniques for gearbox diagnostic: a review //International Journal of Advanced Engineering Technology. – 2012. – Т. 3. – №. 2. – С. 04-12.
2. *Brown D.N., Jorgensen J.C.* Machine condition monitoring using vibration analysis //Bruel & Kjaer, Application Note. – 1987.
3. Неразрушающий контроль: справочник. Т. 7. Кн. 2. Вибродиагностика / Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
4. *Zoungrana W.B., Chehri A., Zimmermann A.* Automatic classification of rotating machinery defects using machine learning (ML) algorithms //Human Centred Intelligent Systems. – Springer, Singapore, 2021. – С. 193-203.
5. *Elango S., Aravind J.G., Boopathi S.* Vibration analysis of bearing by using mechanical stethoscope //International Journal of Advanced Science and Research. – 2018. – Т. 3. – №. 1. – С. 1137-1149.
6. *Kumar S. et al.* Vibration based Fault Diagnosis Techniques for Rotating Mechanical Components //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 376. – С. 012109.
7. *Shahzad K., Cheng P., Oelmann B.* Architecture exploration for a high-performance and low-power wireless vibration analyzer //IEEE Sensors Journal. – 2012. – Т. 13. – №. 2. – С. 670-682.
8. *Scheffer C., Girdhar P.* Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance. – Elsevier, 2004.
9. *Ansari S.A., Baig R.A.* PC-based vibration analyzer for condition monitoring of process machinery //IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1998. – Т. 47. – №. 2. – С. 378-383.
10. *Majumder B.D., Roy J.K., Padhee S.* Recent advances in multifunctional sensing technology on a perspective of multi-sensor system: A review //IEEE Sensors Journal. – 2018. – Т. 19. – №. 4. – С. 1204-1214.
11. *Sanders C.A.* guide to vibration analysis and associated techniques in condition monitoring //DAK Consulting-Chiltern House <http://www.dakacademy.com/newsite/index.php>. – 2011. – С. 3-8.
12. *Cheung K.W., Starling M.J., McGreevy P.D.* A comparison of uniaxial and triaxial accelerometers for the assessment of physical activity in dogs //Journal of Veterinary Behavior. – 2014. – Т. 9. – №. 2. – С. 66-71.
13. *Norton H.N.* Handbook of Transducers, Prentice-Hall, Hoboken, NJ, USA, 1989.
14. *Xianzhong S. et al.* A novel PVDF based high-Gn shock accelerometer //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2005. – Т. 13. – №. 1. – С. 025.
15. *Goyal D., Pabla B.S.* Condition based maintenance of machine tools—A review //CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2015. – Т. 10. – С. 24-35.
16. *Chaudhury S.B., Sengupta M., Mukherjee K.* Vibration monitoring of rotating machines using MEMS accelerometer //International journal of scientific engineering and research. – 2014. – Т. 2. – №. 9. – С. 5-11.
17. *Goyal D., Pabla B.S.* The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: a review //Archives of Computational Methods in Engineering. – 2016. – Т. 23. – №. 4. – С. 585-594.
18. *Fernandez A.* Seismic Velocity Transducers, 2020/
19. *Boyce M.P.* Gas turbine engineering handbook. – Elsevier, 2011.
20. *Gangsar P., Tiwari R.* Multiclass fault taxonomy in rolling bearings at interpolated and extrapolated speeds based on time domain vibration data by SVM

algorithms //Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2014. – Т. 14. – №. 6. – С. 826-837.

21. Liu Y. et al. Asymmetric penalty sparse model based cepstrum analysis for bearing fault detections //Applied Acoustics. – 2020. – Т. 165. – С. 107288.

22. Randall R.B. Frequency Analysis, Bruel and Kjaer, Copenhagen, Denmark, 1987.

23. Trout J. Vibration analysis explained, 2020.

24. Loughlin P.J., Bernard G.D. Cohen–posch (positive) time–frequency distributions and their application to machine vibration analysis //Mechanical systems and signal processing. – 1997. – Т. 11. – №. 4. – С. 561-576.

25. Feng Z., Liang M., Chu F. Recent advances in time–frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: A review with application examples //Mechanical Systems and Signal Processing. – 2013. – Т. 38. – №. 1. – С. 165-205.

26. Runge J., Zmeureanu R. Forecasting energy use in buildings using artificial neural

networks: A review //Energies. – 2019. – Т. 12. – №. 17. – С. 3254.

27. Castelino M. R. et al. Artificial neural network-based vibration signal analysis of rotary machines-case studies //Proceedings of the International Conference on Emerging Trends in Engineering. – 2014. – С. 211-218.

28. Serrano-Guerrero J., Romero F.P., Olivas J.A. Fuzzy logic applied to opinion mining: a review //Knowledge-Based Systems. – 2021. – Т. 222. – С. 107018.

29. Jayaswal P., Wadhvani A.K., Mulchandani K.B. Machine fault signature analysis //International Journal of Rotating Machinery. – 2008. – pp. 1–10.

30. Salido J.M.F., Murakami S. A comparison of two learning mechanisms for the automatic design of fuzzy diagnosis systems for rotating machinery //Applied Soft Computing. – 2004. – Т. 4. – №. 4. – С. 413-422.

31. Katoch S., Chauhan S.S., Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future //Multimedia Tools and Applications. – 2021. – Т. 80. – №. 5. – С. 8091-8126.

Стахова А.П., Макаровський С.Л.

ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ПРИ ПРОВЕДЕННІ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ МАШИН

Під час роботи машини генерують вібрацію, і виникають небажані вібрації, які порушують роботу систем машинного обладнання, що призводить до несправностей. Таким чином, вібраційний аналіз став ефективним методом контролю за справністю та продуктивністю машинного обладнання. Вібраційні сигнали містять важливу інформацію про стан обладнання, таку як джерело несправності та її серйозність. В роботі проведено огляд технік та інструментів, які можна використовувати при проведенні моніторингу та діагностики машинного обладнання за сигналами вібрації. Кожен метод та інструмент мають свої характеристики, переваги та недоліки, що були розглянуті в роботі.

Ключові слова: машинне обладнання, вібрація, перетворення Фур'є, спектр, кепстр, вейвлет.

Stakhova A.P., Makarovskiy S.L.

OVERVIEW OF APPROACHES TO THE ANALYSIS OF VIBRATION SIGNALS DURING MONITORING AND DIAGNOSIS OF MACHINES

When the machine is running, vibration is generated and unwanted vibrations occur that disrupt the operation of machinery systems, resulting in malfunctions. Thus, vibration analysis has become an effective method for monitoring the health and performance of machinery. Vibration alarms contain important information about the condition of the equipment, such as the source of the fault and its severity. The paper provides an overview of techniques and tools that can be used when monitoring and diagnosing machinery for vibration. Each method and tool have its own characteristics, advantages and disadvantages discussed in the work.

Keywords: machinery systems, vibration, Fourier transform, spectrum, caps, wavelet.