

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори техн. наук, професори,
А. А. ШАШКІНА, Є. Ю. БОБРОВ, аспіранти
Криворізький національний університет

МЕТОДИ АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙ ТА АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ БУРОВОЇ УСТАНОВКИ В ПРОЦЕСІ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

Метою дослідження є аналіз методів дослідження віброакустичних сигналів бурової установки в процесі буріння свердловин.

Методи дослідження. У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, методи математичного моделювання, а також методи математичної статистики і теорії ймовірності для формування оцінки результатів дослідження.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні застосування технології обробки сигналів вібрації та акустичної емісії бурової установки для визначення фізико-механічних властивостей гірської породи та технічного стану обладнання в процесі буріння свердловин.

Практичне значення полягає у визначенні комбінації інформативних характеристик віброакустичного сигналу бурової установки в процесі буріння свердловин для підвищення якості його моделювання та керування.

Результати. Складна динаміка бурової установки включає всі основні типи коливань в процесі буріння свердловин. Механізм акустичної емісії та вібрації однаковий у тому, що обидва вони виникають через коливальні рухи в середовищі. Різні режими вібрації, такі як крутильні, бічні та осьові, призводять до зменшення швидкості проникнення (ROP). Вони також можуть спричинити катастрофічні збої та, як мінімум, знос дорогих компонентів бурильної техніки. Вимірюваний супутній віброакустичний сигнал є інтегруючим джерелом, що містять певну інформацію про характер і поточний режим буріння гірської породи. Цей сигнал явно представлений у часовій області поведінкою його амплітуд або в частотній області його спектром. Інформація, що міститься в цьому сигналі, може бути виділена у формі певних характеристичних ознак у часовій, частотній або частотно-часовій області та використана для діагностики стану технологічного обладнання, визначення фізико-механічних характеристик гірської породи та ідентифікації технолого-мінералогічних різновидів руди в процесах розвідки і експлуатації родовищ корисних копалин. Налаштування керування процесом буріння свердловин з урахуванням поточного стану бурового устаткування та фізико-механічних характеристик породи дозволяє підвищити ROP та енергоефективність буріння.

Ключові слова: буріння свердловин, вібрація, акустична емісія, характеристичні ознаки, методи аналізу.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-144-153

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Складна динаміка бурової установки включає всі основні типи коливань в процесі буріння свердловин. Механізм акустичної емісії та вібрації однаковий у тому, що обидва вони виникають через коливальні рухи в середовищі. Різні режими вібрації, такі як крутильні, бічні та осьові, призводять до зменшення швидкості проникнення (ROP). Вони також можуть спричинити катастрофічні збої та, як мінімум, знос дорогих компонентів бурильної техніки. Разом з тим вони несуть певну інформацію про стан обладнання та характеристики гірської породи. Налаштування керування процесом буріння свердловин з урахуванням поточного стану бурового устаткування та фізико-механічних характеристик породи дозволяє підвищити ROP та енергоефективність буріння, а також зменшити інші матеріальні витрати. Але вирішення цієї задачі залишається проблемним питанням.

Аналіз досліджень і публікацій. У роботі [1] розглянуто методи моніторингу стану технічного обладнання. Зазначається, що вибір відповідного методу залежить від характеру інформації, що використовується. Методика моніторингу стану використовується для виявлення суттєвих змін у техніці, що спостерігається. Ці зміни свідчать про розвиток несправності. Моніторинг вібрації - найбільш ефективний метод, який можна використовувати для виявлення механічних дефектів у будь-якому обладнанні, що обертається. Акустична емісія працюючого обладнання використовується для виявлення, визначення місцезнаходження та постійного моніторингу тріщин у багатьох видах конструкцій, трубопроводів і т. д. Методом термографії аналізується активне механічне та електричне обладнання щодо виявлення термічних або механічних дефектів. При моніторингу стану машин і механізмів також проводиться аналіз мастила на наявність певних мікроскопічних частинок, контроль корозії, збір та аналіз фрагментів зношених технологічних агрегатів та ін. У процесі моніторингу необхідно ідентифікувати і вибрати сигнал, що відноситься до компонента, що спостерігається. Наявність та тип несправ-

ності можуть бути виявлені в процесі експлуатації машини, її прогрес відстежуватиметься, отже, буде визначено залишковий термін їх служби.

У статті [2] розглянуто методи обробки віброакустичного сигналу від процесу дезінтеграції породи при обертальному бурінні. Пропонується використовувати вимірний супутній віброакустичний сигнал, що виникає в процесі буріння, як інформаційний ресурс. Процес дезінтеграції гірських порід роторним бурінням відноситься до тих технологічних процесів, математичне моделювання яких на основі відомих законів фізики не приводить до задовільних результатів. Тут можуть бути застосовані емпіричні підходи, які призводять до моделі, призначеної до деякого обмеженого простору. Важливою особливістю процесу дезінтеграції породи є відносно сильна стохастична складова віброакустичного сигналу, що при цьому виникає. Це потребує вибір відповідного методу для ефективної обробки вимірюваного сигналу.

У роботі [3] пропонується використовувати прості аналітичні вирази для визначення амплітуди різного виду вібрацій при механічній обробці деталей але для умов буріння свердловин вони можуть надати у кращому випадку лише загальну якісну оцінку процесів, що при цьому відбуваються.

У роботі [4] стверджується, що основними діагностичними параметрами віброакустичних сигналів є часові характеристики – кореляційна функція $R(\tau)$ та дисперсія $D[\xi(t)]$ процесу, а також його спектральні характеристики – частоти f_k його гармонійних складових та дисперсії σ_k^2 їх випадкових амплітуд γ_k . На додаток до зазначених характеристик, як діагностичні ознаки також використовуються огинаюча кореляційної функції, кепстральні характеристики, а в багатоканальних системах – взаємні кореляційні та спектральні характеристики [5-7].

Постановка завдання: аналіз методів визначення параметрів вібрації та акустичної емісії бурової установки в процесі буріння свердловин для отримання інформації про стан обладнання та характеристики гірської породи.

Викладення матеріалу та результати. Під час буріння свердловини бурильна колона знаходиться під динамічним навантаженням. Як правило, долото та бурильна колона обертаються за допомогою двигуна верхнього приводу на поверхні. Бурильна колона складається з бурильних труб і вузла нижньої частини свердловини (КНБК), з'єднаних між собою кріпильними з'єднаннями. Коли механічна енергія передається від поверхні до долота, це призводить до нелінійної взаємодії між бурильною колоною та свердловиною, що викликає вібрацію всіх складових бурової установки [8]. Комбінації маси, жорсткості та динамічних сил є факторами, які змушують систему вібрувати всіма можливими способами, а саме - аксіально, торсійно та латерально (рис.1) [9].

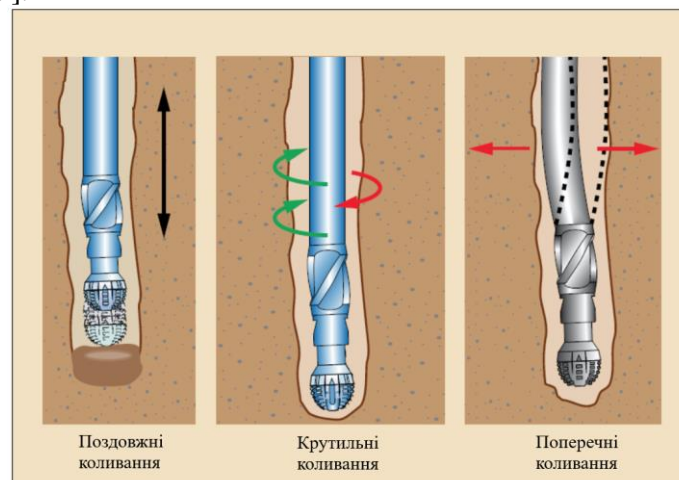


Рис. 1. Вібрації бурильної колони в процесі буріння свердловин

Основними причинами виникнення коливань є стрибкоподібний характер руйнування гірських порід та вибістість вибою свердловини, яка в свою чергу залежить від впливу бурильної колони на вибій при її поздовжніх і крутильних коливаннях, різких і частих змін параметрів режиму буріння, неоднорідності, тріщинуватості і різкої перемежності по твердості порід, що

розбурюються, різниці тиску під зубцями долота. Форма поверхні вибоїподібного вибою може бути різною, але найбільш поширеною є хвилеподібна [8].

Вібрація бурильної колони вважається однією з основних причин неефективного буріння. Завдяки підтримці оптимальних динамічних сил або робочих параметрів, таких як вага на долоті (WOB), швидкість обертання поверхні (RPM), крутний момент на долоті (TOB) і гідравліка долота, ROP та енергоефективність буріння можуть бути значно покращені. Серед різних режимів вібрації крутильна вібрація, що в основному спричинена нерівномірним обертанням долота в свердловині, часто вважається найбільш шкідливою під час буріння на низькій швидкості, що зрештою додає додаткові витрати [10].

Залежність втрат потужності на вібрацію N_{vib} за наявності осьового зусилля ($P \neq 0$) від частоти обертання ω та довжини H бурового ставу може бути виражена у вигляді [11-13]

$$N_{vib} = B(\omega^2 + k_1\omega + k_2) = D\omega^2 + E\varphi(\omega), \quad (1)$$

де B, k_1, k_2, D, E - коефіцієнти пропорційності.

Граничні частоти обертання бурового ставу, з яких починаються інтенсивні вібрації: $\omega_1 \approx 1 \cdot c^{-1}$ (при $P \neq 0$) і $\omega_1 \approx 0,8 \cdot c^{-1}$ (при $P = 0$).

Узагальнена оцінка вібрації може проводитись за віброшвидкістю

$$v_{vib} = 2\pi vA, \quad (2)$$

де v, A - відповідно частота та амплітуда вібрації.

Для визначення непродуктивних втрат енергії та коефіцієнта корисної дії системи буріння важливу роль відіграє оцінка вібропотужності

$$N_{vib} = v_{vib}P_{vib}, \quad (3)$$

де P_{vib} - сила, що змушує вібрацію.

При збільшенні частоти обертання ω характер зростання вібрацій бурового ставу може бути різним. Спостерігаються випадки плавного чи стрибкоподібного зростання вібрації [14]. Таким чином, з точки зору динаміки, реальна пружна система бурового верстата - це складна коливальна система з розподіленими інерційними та пружними параметрами, що має безліч власних частот коливань [15].

Віброакустичні сигнали є стохастичними коливаннями, тому при побудові їх математичних моделей використовуються методи теорії випадкових процесів [4]. В даний час найбільш поширеною моделлю віброакустичних сигналів є стаціонарні випадкові процеси з дискретним спектром, які можуть бути представлені в комплексній формі в наступному вигляді [16]

$$\xi(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \gamma_k e^{i2\pi f_k t}, \quad (4)$$

де γ_k - незалежні однаково розподілені комплексні випадкові величини, які мають математичні очікування $M[\gamma_k] = 0$, а дисперсії $D[\gamma_k] = \sigma_k^2$.

Кореляційна функція процесу (1) є майже періодичною функцією і дорівнює

$$R(\tau) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sigma_k^2 e^{i2\pi f_k \tau}. \quad (5)$$

З формули (2) випливає, що дисперсія процесу (1) дорівнює

$$D[\xi(t)] = R(0) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sigma_k^2. \quad (6)$$

Дисперсії σ_k^2 випадкових амплітуд γ_k гармонійних складових із частотами f_k визначають спектр випадкового процесу (1).

Вимірюваний супутній віброакустичний сигнал є інтегруючим джерелом, що містить певну інформацію про характер і режим поточного буріння гірської породи [2]. Цей сигнал явно представлений у часовій області поведінкою його амплітуд або в частотній області його спектром. Інформація, що міститься в цьому сигналі, може бути виділена у формі певних характеристик ознак у часовій, частотній або частотно-часовій області та використана для діагностики стану технологічного обладнання, визначення фізико-механічних характеристик гірської породи та ідентифікації технолого-мінералогічних різновидів руди в процесах розвідки і експлуатації родовищ корисних копалин. На рис. 2 наведена робоча схема процедури аналізу сигналу вібрації та акустичної емісії бурової установки для вирішення цієї задачі [2].

Аналіз у часовій області включає візуалізацію та аналіз віброакустичних сигналів у часі [17]. Метод візуального перегляду форми хвилі у часі не слід недооцінювати, оскільки таким чином можна отримати багато інформації, що включає наявність амплітудної модуляції, перехідних процесів і високочастотних компонентів [18]. Однак простий аналіз віброакустичних сигналів не дозволяє відокремити варіації інформаційних складових від шумових даних. Таким чином, потрібен метод обробки сигналу, щоб отримати важливу інформацію із сигналів у часовій області шляхом перетворення необроблених сигналів у відповідні статистичні параметри, такі як пік, RMS, амплітудний коефіцієнт, ексцес та ін.

Пік – це максимальне значення сигналу протягом вимірюного часу, яке можна визначити як [18]

$$\text{peak} = |v(t)|_{\max}. \quad (7)$$

При наявності текстурно-структурних неоднорідностей гірської породи, пікові значення віброакустичного сигналу будуть змінюватися. У разі несправності несправностей бурового обладнання пікове значення отримуваних сигналів збільшується. Серйозність і тип несправності можна оцінити за амплітудами відповідних піків.

Середньоквадратичне значення (RMS) відображає потужність вібрації. Це найпростіший і ефективний метод виявлення несправностей бурового обладнання, особливо дисбалансу в обертових машинах [19]. Однак цей метод більше підходить для використання у стаціонарному режимі роботи устаткування та аналізу однієї форми синусоїди [17]. RMS є кращим за піковий метод через чутливість останнього до шуму (рис. 3) [20].

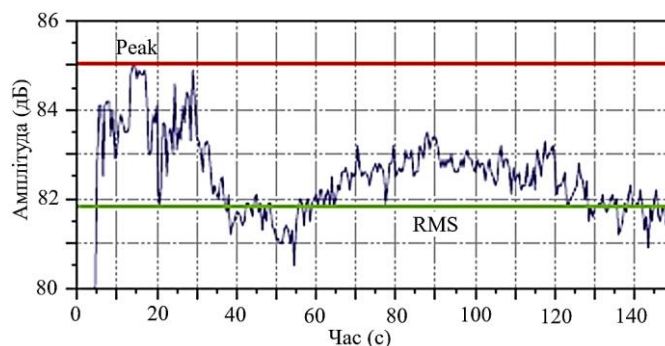


Рис. 3. Середньоквадратичне значення (RMS) та пік віброакустичного сигналу

Для будь-якої безперервної функції $f(t)$ в інтервалі $T_2 - T_1$ середньоквадратичне значення може бути представлено

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} f(t) dt}. \quad (8)$$

Метод RMS має два недоліки [21]. По-перше, на середньоквадратичні значення віброакустичного сигналу не впливають ізольовані піки, що знижує його чутливість до неоднорідностей гірського масиву типу тріщин і пір. Крім того, на нього також незначно впливають короткі спалахи вібрацій низької інтенсивності.

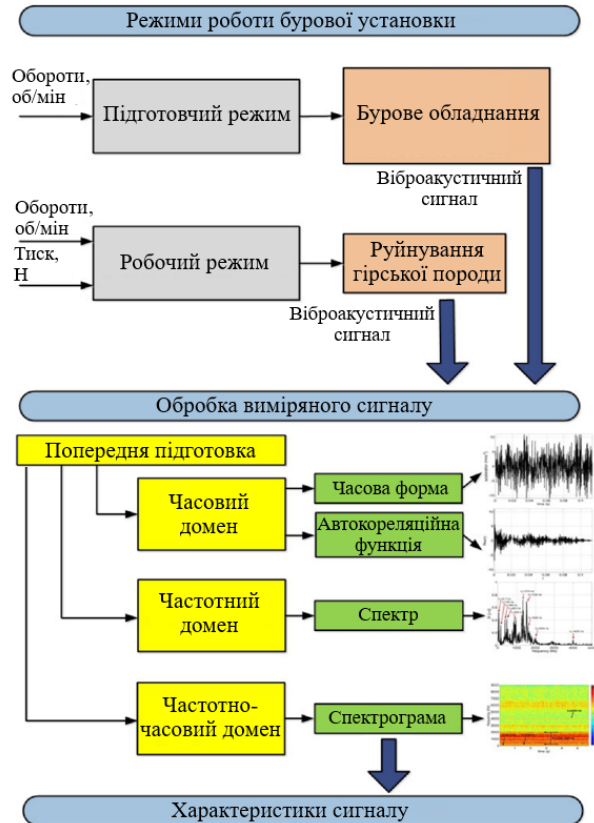


Рис.2. Схема процедури аналізу сигналу вібрації та акустичної емісії бурової установки

Крест-фактор - це відношення пікового значення вхідного сигналу до середньоквадратичного значення, яке представлено таким чином [17]:

$$\text{CrestFactor} = \frac{\text{peak}}{\text{RMS}}. \quad (9)$$

Для чистої синусоїди пік-фактор дорівнює $\sqrt{2} = 1.414$, а для нормально розподіленого випадкового шуму значення буде приблизно 3. Порівняно з піковими та середньоквадратичними значеннями, пік-фактор зазвичай використовується, коли вимірювання проводяться на різних швидкостях обертання, оскільки він не залежить від швидкості. Крест-фактори також надійні лише за наявності значної імпульсивності [20].

Ексцес E є мірою гостроти піку у розподілі випадкових величин. Для будь-якого розподілу величин можна розрахувати значення середньої величини. У даному контексті коефіцієнт ексцесу показує, чи перебувають більшість значень розподілу в безпосередній близькості до середньої величини, або вони розподілені віддалено від неї. Ексцес не чутливий до швидкості обертання або навантаження бурового обладнання, і його ефективність залежить від наявності значної імпульсивності в сигналі [17,22].

$$E = \frac{\sum(x_i - M^4)}{N\sigma^4} - 3, \quad (10)$$

де M – середнє арифметичне; σ - стандартне відхилення.

Для нормального розподілу величин значення ексцесу дорівнює нулю. Якщо значення ексцесу належить до діапазону позитивних чисел, аналізований розподіл величин є відносно гострим. В іншому випадку (негативний коефіцієнт) аналізований розподіл є відносно згладженим.

Для аналізу форми розподілу також може бути застосований такий показник як *асиметрія* A

$$A = \frac{\sum(x_i - M)^3}{N\sigma^3}. \quad (11)$$

У програмах моніторингу стану механічного обладнання ексцес зазвичай є кращим, ніж крест-фактор, але останній використовується більш широко. Це пов'язано з тим, що лічильники, які можуть реєструвати значення крест-фактора є більш доступними порівняно з вимірювачем ексцесу.

Аналіз у частотній сфері. Аналіз у частотній області включає аналіз фізичних сигналів чи часових рядів даних із частоти [17,19]. Він показує кількість сигналів, що у заданій смузі частот у певному діапазоні частот. Більшість реальних сигналів можна розбити на комбінацію унікальних синусоїд. Кожна синусоїда буде виглядати як вертикальна лінія в частотній області, де висота та положення лінії представляють амплітуду та частоту відповідно. При аналізі частотної області амплітуда наноситься на графік відносно частоти та порівнюється з часовою областю, а виявлення резонансної частотної складової легше. Кілька характеристик сигналу, які не можна визначити у часовій області, можна спостерігати за допомогою аналізу частотної області. Однак частотний аналіз не підходить для сигналів, частоти яких змінюються з часом.

FFT (*Швидке перетворення Фур'є*). Перетворення Фур'є (FT) перетворює сигнал у часовій області в частотну область, створюючи спектр. FT виконується відповідно до виразу [17].

$$F(w) = Ff(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-iwt} dt \quad (12)$$

де w - частота, а t - час.

Перетворення назад у часову область із частотної області можна здійснити шляхом зворотного перетворення Фур'є (IFT). Ця процедура виконується відповідно з формулою

$$f(t) = F^{-1}(F(w)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(w)e^{iwt} dw. \quad (13)$$

FFT - це ефективний і широко використовуваний алгоритм для отримання дискретизованих сигналів часу. FFT графік безвідмовних промислових машин складається лише з одного піку, який представляє власну частоту працюючої машини. Характеристичні ознаки процесу буріння свердловин можна отримати завдяки наявності на графіку інших піків, окрім піку власної частоти.

Кепстральний аналіз заснований на визначенні функції зворотного перетворення Фур'є від логарифму спектра потужності сигналу [23]

$$C_s(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \ln|S(w)|^2 e^{i w q} dw, \quad (14)$$

де $S(w)$ – спектр вхідного сигналу, q – кепстральний час.

Цей аналіз можна використовувати для виявлення будь-якої періодичної структури в спектрі, такої як гармоніки, бічні смуги або відлуння [24]. Зокрема, такий підхід дозволяє виявляти низькі гармонічно пов'язані частоти. Існує чотири типи кепстра: справжній кепстр, комплексний кепстр, кепстр потужності та фазовий кепстр. Кепстр потужності є найбільш широко використовуваним кепстром у діагностиці та моніторингу стану машин.

Аналіз огинаючої, також відомий як амплітудна демодуляція або демодульований резонансний аналіз. [17,25]. Цей метод відокремлює низькочастотний сигнал від фонового шуму [19]. Аналіз огинаючої складається зі смугової фільтрації та етапу демодуляції, який виділяє огинаючу сигналу, а його спектр, можливо, містить необхідну діагностичну інформацію [26]. Проблема цього підходу полягає у визначенні найкращої смуги частот для огинання. Для безперебійної роботи аналізу огинаючої потрібен чіткий фільтр і точне визначення смуги частот для фільтрації [18].

Аналіз спектру пов'язаний із FFT таким чином, що цей метод часто використовується в спектральному аналізі для перетворення сигналу з часової області в частотну [27]. Порівняння спектру слід проводити за логарифмічною шкалою амплітуд (дБ), оскільки зміни на логарифмічній осі можуть визначити стан вібрації. Однак доводиться мати справу з невеликими коливаннями швидкості обертання машини [18]. Аналіз спектру – це комплексний аналіз, який все ще вимагає експертних навичок для використання діагностичних можливостей спектрального аналізу. У порівнянні з кепстральним аналізом спектральний аналіз не надає жодної інформації щодо часової локалізації частотної складової [28]. Було помічено, що цей підхід може давати згладжені спектральні оцінки сигналів вібрації з високою роздільною здатністю порівняно з підходом FFT [29].

Аналіз у частотно-часовій області. Він включає методи, що використовуються одночасно в часовій і частотній областях. Цей аналіз передбачає вивчення двовимірного сигналу. Часова та частотна області інтегровані в аналіз частотно-часової області [17]. Згадані вище підходи до аналізу віброакустичного сигналу (методи часової та частотної областей) здебільшого покладаються на припущення, що не можна виявити локальні особливості в часовій та частотній областях одночасно [30]. Таким чином, такі методи непридатні для аналізу нестационарних сигналів. Під час обробки сигналів, природа яких швидко змінюється з часом, часто корисно враховувати частотний вміст коротких сегментів сигналу. Це дає змогу сформулювати більш загальний спектр як двовимірну функцію, що залежить не тільки від частоти, але й від положення в часі.

Спектрограма як основа частотно-часового аналізу є одним із важливих інструментів технічної діагностики. Спектрограма відображає зміни в спектрі потужності сигналу в часі. У разі оцінювання віброакустичного сигналу частотно-часовий аналіз може бути корисним для вивчення змін спектральних властивостей сигналу через зміну властивостей об'єкта, що контролюється. Графічне представлення спектрограми можна розуміти як високоінтегроване джерело інформації. Інформаційна цінність такого подання висока порівняно з більш простими формами інформації. Спектрограма може бути виражена як часова послідовність її спектрів потужності, де ці спектри потужності мають структуру $N/2$ векторів елементів [2]

$$S_{xx}(f_k, j) = \left[S_{xx}(f_0, j), S_{xx}(f_1, j), \dots, S_{xx}\left(f_{\frac{N}{2}-1}, j\right) \right]. \quad (15)$$

Елементи $S_{xx}(f_k, j)$ спектру потужності є середніми значеннями файлів, пов'язаними з j -м моментом часу та k -м компонентом частоти потужності сигналу f_k . Параметр N представляє кількість вибірок у сегменті цього сигналу.

Вейвлет - перетворення WT [31] - це лінійне перетворення, що розкладає сигнал часу на вейвлети, які є локальними функціями часу, оснащеними заданим частотним вмістом. Замість синусоїдальних функцій в якості основи використовуються вейвлети [30]. Вейвлет-перетворення для безперервного сигналу щодо вейвлет функції визначається виразом [17,32]

$$T(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (16)$$

де ψ^* - означає комплексне спряжене для ψ ; параметр $b \in R$ відповідає часовому зрушенню, і називається параметром положення, параметр $a > 0$ задає масштабування та називається параметром розтягування; $w(a) = \frac{1}{\sqrt{a}}$ - вагова функція.

Відповідно до структури сигналу необхідно вибрати певну основу вейвлету, щоб уникнути оманливих результатів діагностики. WT забезпечує кращу часову локалізацію на високих частотах порівняно з STFT, є кращим інструментом при роботі з нестационарними сигналами та при аналізі перехідних процесів [33].

Розподіл Вінгнера–Вілля (WVD). Це окремий випадок розподілу класу Коена, який дає частотно-часову щільність енергії, обчислену шляхом кореляції сигналу з часовою та частотною трансляцією самого себе [34]. WVD сигналу $x(t)$ представлено як [17]

$$W_x(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{-j\tau\omega} d\tau \quad (17)$$

де x^* - спряжена величини x ; τ - змінна затримки.

WVD має кілька переваг, таких як краща роздільна здатність, ніж STFT, відмінна точність, і функція вікна не потрібна для його аналізу [35].

Направлений розподіл Вігнера (dWD) був спеціально розроблений для аналізу перехідних комплексних сигналів і застосований в обертових машинах [36]. Результати показали, що акустичні сигнали були більш ефективними для раннього виявлення несправностей порівняно з вібраційними сигналами. Використовуючи цей запропонований метод, можна отримати більш надійні результати діагностики в ситуації, коли складно відстежити гармоніки [17].

Перетворення Гільберта–Хуанга (ННТ). Процедура ННТ складається з емпіричного розкладання сигналів (EMD) і перетворення Гільберта. Шляхом поєднання цих двох методів можна отримати спектр Гільберта для визначення характеристик стаціонарних, нестационарних і перехідних сигналів [30, 37]. За допомогою цього методу складний багатокомпонентний сигнал розбивається на ряд функцій внутрішнього режиму (IMF). Використовуючи техніку EMD, складний сигнал можна реконструювати за допомогою IMF, виражених як [17]

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} c_i(t) + r_n(t) dt, \quad (18)$$

де $c_i(t)$ – IMF; $r_n(t)$ - залишковий сигналом, який представляє повільно змінний або постійний тренд сигналу [30].

ННТ має кілька переваг, таких як низький час обчислення, і він не пов'язаний з будь-якою згорткою [35]. Однак EMD, яка є основною частиною ННТ, має певні недоліки. Можна неправильно витлумачити результат через незавидні IMF, створені в області низьких частот. Крім того, сигнали низькочастотних компонентів не можуть бути розділені.

Короткочасне перетворення Фур'є (STFT). Технологія STFT має здатність протидіяти обмеженням FFT і в основному застосовується для виділення вузькосмугового частотного вмісту в нестационарних або зашумлених сигналах [17]. У методі STFT початковий вібраційний сигнал розбивається на часові сегменти за допомогою вікна, а потім FT застосовується до кожного сегменту часу [35]

$$STFT(f, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) w(t - \tau) e^{-2\pi f t} dt, \quad (19)$$

де $x(t)$ - інтерпретований сигнал, а $w(t)$ - віконна функція з центром у часі T .

STFT залежить від ширини вікна. Велика ширина вікна вибирається для отримання більшої точності частоти, тоді як для підвищення точності в часі бажана мала ширина вікна. Основним недоліком цього підходу є те, що він не може досягти високої роздільної здатності в часовій і частотній області одночасно.

Спектральна густина потужності (PSD). PSD можна застосовувати для вимірювання амплітуди коливальних сигналів у даних часового ряду та визначення енергетичної сили частот, що може бути корисним для подальшого аналізу [17]. Зі складного спектру можна обчислити односторонню PSD як

$$PSD(f) = \frac{2|X(f)|^2}{(t_2 - t_1)}, \quad (20)$$

де $t_2 - t_1$ – часовий діапазон, а $X(f)$ – комплексний спектр вібрації в часовому діапазоні, який можна виразити в одиницях $(m/s^2/Hz)$.

PSD можна також безпосередньо розрахувати в частотній області, якщо використовується ШПФ вібраційного сигналу, застосовуючи таку формулу [38]

$$PSD = \frac{(\sigma_{RMS})^2}{f}, \quad (21)$$

де G_{RMS} середньоквадратичне прискорення на певній частоті.

PSD може аналізувати дефектні смуги частот, не стикаючись із проблемою зміни ковзання, і не обов'язково зосереджується на одній конкретній гармоніці [39]. Він вимагає дуже мало обчислювальної потужності і може бути безпосередньо обчислений FFT або шляхом перетворення автокореляційної функції [35].

Наведені вище методи аналізу віброакустичного сигналу, що виникає при бурінні свердловин, можуть бути практично реалізовані завдяки чисельним програмно-технічним продуктам як універсального, так професійно-спрямованого призначення. Далі розглянуто приклад аналізу вібраційного сигналу, отриманого в процесі зміни RPM бурової установки, за допомогою програмного пакету Matlab 2023b [40].

На рис. 4 наведено результати аналізу зазначеного сигналу у часовій (а), частотній (б) та частотно-часовій (в) областях. У табл. 1 наведена інформація щодо характеристичних параметрів аналізованого сигналу у часовій області, а у табл. 2 - параметри аналізованого сигналу вібрації в частотній та частотно-часовій областях.

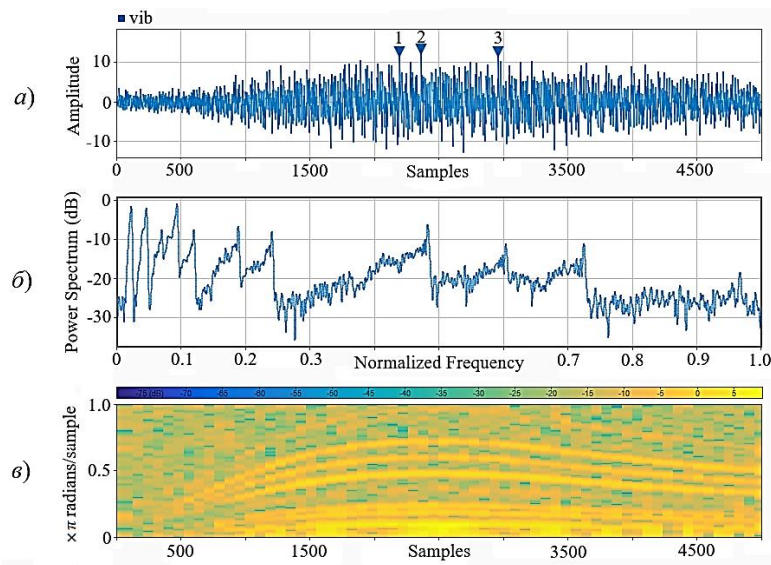


Рис. 4. Результати аналізу сигналу вібрації бурової установки в процесі зміни робочого режиму у часовій (а), частотній (б) та частотно-часовій областях (в)

Таблиця 1

Параметри аналізованого сигналу вібрації бурової установки у часовій області

Параметр	Value Min/ Max	Mean	Median	RMS	Peak 1 Values/ Times	Peak 2 Values/ Times	Peak 3 Values/ Times
Значення	-1.28e+1/ 1.20e+01	-2.10e-15	-5.548e-2	3.10e+00	1.13e+01/2197	1.20e+01/2363	1.14e+01/2962

Таблиця 2

Параметри аналізованого сигналу вібрації в частотній та частотно-часовій областях (RBW = 0.001954)

Спектр				Спектрограма					
Y-Axes Limits		Frequency Limits, $\times \pi$ radian/sample		Time Limits, samples		Frequency Limits, $\times \pi$ radian/sample		Power Limits	
Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
-3.7e+1	9.08e-1	0	1	1.85e+2	4.96e+3	1.35e-1	8.15e-1	-7.946	8.881

Результати виконаного аналізу свідчать про можливість використання досліджених методів для формування комплексу характеристичних ознак віброакустичного сигналу бурової установки з метою діагностики стану її технічних складових та оцінки фізико-механічних характеристик гірської породи безпосередньо в процесі буріння.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Проаналізовано методи обробки сигналів вібрації та акустичної емісії бурової установки для визначення фізико-механічних властивостей

гірської породи та технічного стану обладнання в процесі буріння свердловин. Вимірюваний супутній віброакустичний сигнал є інтегруючим джерелом, що містить певну інформацію про поточний режим буріння гірської породи. Цей сигнал явно представлений у часовій області поведінкою його амплітуд або в частотній області його спектром. Інформація, що міститься в цьому сигналі, може бути виділена у формі певних характеристичних ознак у часовій, частотній або частотно-часовій області та використана для діагностики стану технологічного обладнання, визначення фізико-механічних характеристик гірської породи та ідентифікації технологічно-мінералогічних різновидів руди в процесах розвідки і експлуатації родовищ корисних копалин. В свою чергу, налаштування керування процесом буріння свердловин з урахуванням поточного стану бурового устаткування та фізико-механічних характеристик гірської породи дозволяє підвищити ROP та енергоефективність буріння [41].

Напрямок подальших досліджень є синтез моделі процесу буріння гірської породи залізородних родовищ, оцінка ефективності різних комбінацій вимірюваних параметрів та обчислювальних алгоритмів, розробка алгоритму оптимізації процесу буріння.

Список літератури

1. **Kumar, S., Lokesha, M., Kumar, K., Srinivas, K.** Vibration-based fault diagnosis techniques for rotating mechanical components: A review article. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2018, 376, 012109.
2. **Flegner, P., Kačur, J., Durdán, M., Laciak, M.** Evaluation of the Acceleration Vibration Signal for Aggregates of the Horizontal Drilling Stand. Appl. Sci. 2022, 12, 3984. <https://doi.org/10.3390/app12083984>.
3. **Amit S. Wani, Gayatri S. Sagavkar, Vaibhav K. Bhate.** Vibration analysis of drilling operation. International Journal of Students Research in Technology & Management, Vol 1(2), April 2013, pp. 163-175. www.giapjournals.com Page 163.
4. **Babak, V., Beregun, V., Krasilnikov, A.** Methods and means of vibrodiagnostics of units of cogeneration installations. - Special Issue of e-Journal of Nondestructive Testing (eJNDT) ISSN 1435-4934 **Vol. 22(11)**. <http://www.ndt.net/?id=21640>.
5. Вібрації у техніці: Довідник, в 6-ти т. Ред. рада: В.М. Челомей (голова). М., Машинобудування, 1981, Т. 5. Вимірювання та випробування. За ред. М.Д. Генкіна, 1981, 496 с.
6. **Яворський І.М.** Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань. Львів, ФМІ НАНУ, 2013, 804 с.
7. **С.В. Бабак, М.В. Мислович, Р.М. Сисак, К. Статистична діагностика електротехнічного устаткування: Монографія.** - Ін-т електродинаміки НАН України, 2015, 456 с.
8. **А. С. Новіков, Д. Ю. Серіков.** Деякі особливості роботи бурових доліт та практичні прийоми при їх використанні. -| СФЕРА. НАФТА ІГАЗ, 2/2020 (76).
9. Drillstring Vibrations and Vibration Modeling. - 2010 Schlumberger, 10-DR-0263. <https://www.slb.com/-/media/files/drilling/brochure/drillstring-vib-br>.
10. **Parimal Patil, Catalin Teodoru.** Analysis of Bit-Rock Interaction During Stick-Slip Vibration Using PDC Cutting Force Model. - September 2013, Oil Gas European Magazine 39(3):124
11. **Бритарев В.А., Замишляєв В.Ф., Баранникова І.В., Бритарев І.В.** Механічне обладнання для кар'єрів. Частина І. Бурові верстати відкритих розробок. - МГТУ, 1998.
12. **Жуковський А.А., Нанкін Ю. А., Сушинський В.А.** Привід та система управління бурових верстатів для кар'єрів. - Надра, 1990. - 223 с.: іл.
13. **Зайченко С.Г.** Дослідження та вибір методів зниження вібрації при бурінні вибухових свердловин у міцних породах верстатами типу СБШ-250. - Дис. канд. тех. наук. - 1977.
14. **Кантович Л. І., Дмитрієв В. Н.** Статика та динаміка бурових шарошечних верстатів. - Надра, 1984, 200 с.
15. **Егамбердієв І.П.** Методи оцінки технічного стану бурових верстатів/монографія - Навої: вид-во ім. Алішер Навої, 2019, 186 с. ISBN 978-9943-5884-4-8.
16. Гіхман І.І., А.В. Скорохід. Введення у теорію випадкових процесів. - Наука, 1977, 567 с.
17. **Mohamad Hazwan Mohd Ghazali, Wan Rahiman.** Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review. - Shock and Vibration, Volume 2021, Article ID 9469318, 25 pages. <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>.
18. **I. Howard.** A review of rolling element bearing vibration detection, diagnosis and prognosis. - Report for the Defence Science and Technology Organization Canberra (Australia). Report no. DSTO-RR-0013, October. Victoria, Tech. Rep., DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory., 1994, Tech. Rep.
19. **M. Vishwakarma, R. Purohit, V. Harshlata, P. Rajput.** Vibration analysis & condition monitoring for rotating machines: a review, Materials Today: Proceedings, vol. 4, no. 2, pp. 2659–2664, 2017.
20. **A. Aherwar, M. S. Khalid.** Vibration analysis techniques for gearbox diagnostic: a review. - International Journal of Advances in Engineering & Technology, vol. 3, no. 2, pp. 4–12, 2012.
21. **Mehrbod Khoshouei, Raheb Bagherpour, Mohammad Hossein Jalalian, Mojtaba Yari.** Investigating the acoustic signs of different rock types based on the values of acoustic signal RMS. - Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin), 2020, pp. 29-38. DOI: 10.17794/rgn.2020.3.3.
22. **J. Runesson.** Vibration analysis for condition monitoring of mechanical presses. - Lund University, Lund, Sweden, 2019, Master's Thesis.
23. **Y. Liu, Z. Jiang, H. Haizhou, J. Xiang.** Asymmetric penalty sparse model based cepstrum analysis for bearing fault detections. -Applied Acoustics, vol. 165, p. 107288, 2020.
24. **N. Aiswarya, S. Suja Priyadharsini, K. Moni.** An efficient approach for the diagnosis of faults in turbo pump of liquid rocket engine by employing fft and time-domain features. - Australian Journal of Mechanical Engineering, vol. 16, no. 3, pp. 163–172, 2018.

25. **R. B. Randall**, Frequency Analysis. - Bruel and Kjaer, Copenhagen, Denmark, 1987.
26. **D. Abboud, J. Antoni, S. Sieg-Zieba, M. Eltabach**. Envelope analysis of rotating machine vibrations in variable speed conditions: a comprehensive treatment. - Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 84, pp. 200–226, 2017.
27. **J. Trout**. Vibration analysis explained. - 2020.
28. **S. S. Aralikkatti, K. Ravikumar, H. Kumar**. Fault diagnosis of single point cutting tool using spectrum, cepstrum and wavelet analysis. - Proceedings of the 1st International Conference on Manufacturing, Material Science and Engineering, pp. 1–9, Telangana, India, August 2019.
29. **M.-J. E. Salami, A. Gani, T. Pervez**. Machine condition monitoring and fault diagnosis using spectral analysis techniques. - Proceedings of the 1st International Conference on Mechatronics, pp. 690–700, Kuala Lumpur, Malaysia, June 2001.
30. **Z. Feng, M. Liang, F. Chu**. Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: a review with application examples. - Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 38, no. 1, pp. 165–205, 2013.
31. **Y. Wei, Y. Li, M. Xu, W. Huang**. A review of early fault diagnosis approaches and their applications in rotating machinery. - Entropy, vol. 21, no. 4, p. 409, 2019.
32. **Addison P.S.** The Illustrated Wavelet Transform Handbook. - IOP, 2002.
33. **B. Bao Liu, S.-F. Ling, Q. Qingfeng Meng**. Machinery diagnosis based on wavelet packets. - Journal of Vibration and Control, vol. 3, no. 1, pp. 5–17, 1997.
34. **V. Climente-Alarcon, J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, R. Puche-Panadero, L. Escobar**. Application of the Wigner-Ville distribution for the detection of rotor asymmetries and eccentricity through high-order harmonics. - Electric Power Systems Research, vol. 91, pp. 28–36, 2012.
35. **D. Goyal, B. S. Pabla**. The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: a review. - Archives of Computational Methods in Engineering, vol. 23, no. 4, pp. 585–594, 2016.
36. **Y.-S. Han, C.-W. Lee**. Directional Wigner distribution for order analysis in rotating/reciprocating machines. - Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 13, no. 5, pp. 723–737, 1999.
37. **N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long et al.** The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. - Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 454, no. 1971, pp. 903–995, 1998.
38. **K. Mollazade, H. Ahmadi, M. Omid, R. Alimardani**. An intelligent combined method based on power spectral density, decision trees and fuzzy logic for hydraulic pumps fault diagnosis. - International Journal of Intelligent Systems and Technologies, vol. 3, no. 4, pp. 251–263, 2008.
39. **J. Cusid, L. Romeral, J. A. Ortega, J. A. Rosero, A. Garcia Espinosa**. Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition. - IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 2, pp. 633–643, 2008.
40. **Brandt, Anders**. Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures. - Chichester, UK: John Wiley and Sons, 2011.
41. **Моркун В. С., Моркун Н. В., Тронь В. В., Гапоненко А. А., Гапоненко І. А., Паранюк Д. І.** Методи оптимізації процесу буріння свердловин. – Кривий Ріг: Гірничий вісник. 2020. Вип. 107. С. 96-101.

Рукопис подано до редакції 29.03.24

UDC 622.1

V. V. PEREGUDOV, Dr. Eng., Prof., Head of Department, Kryvyi Rih National University

A. V. BOLOTNIKOV, Ph.D., Director, Collective Enterprise "Academic House"

Y. V. PEREGUDOV, Ph.D., Researcher, LLC "Kryvbasproject"

A. O. ROMANENKO, Ph.D.; Chief Researcher, Collective Enterprise "Academic House"

O. V. ROMANENKO, Dr. Eng., Deputy Director for Scientific Affairs

Limited liability company "Mining and civil engineering"

D. A. DEMCHENKO, Leading engineer, Limited liability company "Mining and civil engineering"

ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF THE METHODOLOGY FOR TRACTIVE CALCULATIONS OF OPEN-PIT RAIL TRANSPORT

Purpose. Based on the existing Norms of Technological Design for Mining Enterprises with Open-Pit Mining of Mineral Deposits, an improved methodology is proposed for efficient traction calculations of industrial open-pit railway transport using MS Excel; this opens up opportunities for further research, design, and analysis of industrial open-pit railway transport movement.

Research methods. Thanks to the inclusion in Appendix B to the Norms of Technological Design for Mining Enterprises with Open-Pit Mining of Mineral Deposits, the reader can find a methodology for conducting traction calculations for industrial open-pit railway transport. In this article, the authors focused on the methodology, providing detailed explanations and conducting a thorough analysis of its key aspects. The inclusion of this material opens up new opportunities for understanding and improving traction calculation processes in the field of industrial open-pit railway transport, as well as laying the groundwork for further research and development in this area.

Scientific novelty. For the first time, a deep analysis of the traction calculation algorithm for industrial open-pit railway transport, described in the methodology of the current Norms of Technological Design for Mining Enterprises with Open-Pit Mining of Mineral Deposits, has been conducted. After careful analysis, flaws and inaccuracies in the mentioned methodolo-