

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-50-58>

УДК 622.7: 534

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЇ БУРОВОЇ УСТАНОВКИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ВІДСТЕЖЕННЯ ПОРЯДКУ ОБЕРТОВИХ МАШИН

Моркун В.С., Моркун Н. В., Поркуян О.В., Грищенко С.М.,
Бобров Є. Ю., Грищенко Я.О.

DETERMINATION OF THE VIBRATION PARAMETERS OF A DRILLING RIG USING THE METHOD OF COMPUTED ORDER TRACKING OF ROTATING MACHINES

Morkun V.S., Morkun N.V., Porkuian O.V., Hryshchenko S.M.,
Bobrov E.Yu., Hryshchenko Ya.O.

Метою дослідження є визначення параметрів вібрації бурової установки в процесі буріння свердловин за допомогою методу відстеження порядку обертових машин. 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 методу відстеження обчисленого порядку обертових машин для визначення частоти на якій доцільно вимірювати статистичні параметри супутнього вібраційного сигналу. Практичне значення полягає у визначенні процедури вимірювання параметрів вібраційного сигналу бурової установки для оцінки фізико-механічних властивостей гірської породи безпосередньо в процесі буріння свердловин. Для виділення корисної складової вібраційного сигналу на буровому долоті з різноманітних завад (вібрації інших частин бурової установки, зовнішні процеси у гірському масиві і т. і.) використаний метод відстеження обчисленого порядку (COT) обертових машин з додатковою передискретизацією для підвищення його роздільної здатності. Запропонований підхід полягає в тому, що в процесі зміни робочого режиму приводу обертових частин бурової установки формують карту порядку в усьому діапазоні його обертів, визначають частоту високоамплітудної вібрації долота, яка відповідає визначеному піковому порядку обертів, і на цій частоті вимірюють статистичні параметри змін амплітуди вимірюваного сигналу. Відповідно до застосованого методу сформовано карту частоти обертів для даних вібрації в процесі зміни робочого режиму бурової установки (підвищення впродовж 40 секунд частоти обертів приводу з 500 до 2150 обертів за хвилину). Аналіз виконаних експериментальних досліджень та

моделювання процесу взаємодії долота з залізо-вмісною гірською породою дозволяє зробити висновок про те, що отримані із застосуванням зазначеного методу статистичні показники супутнього вібраційного сигналу дійсно адекватно характеризують процес буріння свердловин.

Ключові слова: буріння свердловин, вібрація, відстеження порядку, ознаки.

Вступ. Обертальне буріння є стандартним методом, що використовується в гірничій промисловості при розвідці та видобутку корисних копалин. Бурові установки, що застосовуються в даний час, сильно розрізняються за своєю конструкцією, призначенням і можливостями. Станіонарні бурові установки використовуються в основному для розвідувального буріння та при видобуванні вуглеводневої сировини, мобільні (пересувні) – для буріння експлуатаційних та вибухових свердловин.

Основними складовими частинами будь-якої бурової установки є приводний силовий блок із трансмісією, бурильна колона (штанга) та блок бурового інструменту. Крім того, використовуються ряд систем, що забезпечують процес буріння: система очищення свердловини і транспортування зруйнованої гірської маси; система моніторингу стану бурової установки; система керування процесом буріння. Силовий блок забезпечує підйом і опускання бурового інструменту, а також формує момент, що крутить, який за допомогою бурильної колони (штанги) передається від приводного двигуна на буровий інструмент. Долото, що обертається, руйнує

гірську породу, яка транспортується на поверхню гідравлічним (буровий розчин) або пневматичним (стиснене повітря) методом. Системи моніторингу стану та управління буровою установкою забезпечують її безперебійну експлуатацію та оптимізацію технічних та економічних показників процесу буріння.

Метою даної роботи є визначення параметрів вібрації бурової установки в процесі буріння свердловин за допомогою методу відстеження порядку обертових машин. Постановка завдання: дослідження методу відстеження порядку обертових машин для визначення параметрів вібрації бурового долота в процесі буріння свердловин.

Викладання основного матеріалу. Досягнення високих швидкостей проходки (ROP) є однією із основних цілей оптимізації керування процесом буріння.

ROP в першу чергу залежить від змін навантаження на долото (WOB) та швидкості обертання долота (RPM). Маючи на увазі весь можливий робочий діапазон змін WOB та RPM цей зв'язок є нелінійним. Це зумовлено закономірностями взаємодії долота з гірською породою і її змінними фізико-механічними характеристиками. Проблемним питанням для вирішення завдання оптимального керування бурінням свердловин є оперативне визначення фізико-механічних характеристик гірської породи, що буриться.

Зазвичай, долото і бурильна колона (штанга) обертаються за допомогою двигуна з верхнім приводом на поверхні. Оскільки механічна енергія передається від поверхні до долота, це призводить до нелінійної взаємодії між бурильною колоною та свердловиною, що викликає вібрацію бурильної колони. Поєднання маси, жорсткості та динамічних сил є факторами, які змушують систему вібрувати всіма можливими способами, а саме. аксіально, латерально та торсіонно.

У роботі [1] запропоновано модель бурової штанги із зосередженою масою, яка складається з двох ступенів свободи. Рівняння руху для осьового та крутильного рухів бурильної колони

$$m\ddot{x} + c_a\dot{x} + k_a(x - v_0 \times t) = -WOB, \quad (1)$$

$$J\ddot{\theta} + c_t\dot{\theta} + k_t(\theta - \Omega \times t) = -TOB, \quad (2)$$

де TOB , m , x , J , c_a , c_t , k_a , k_t , v_0 , θ , Ω - відповідно крутний момент на долоті, ефективна маса бурильної штанги, осьове зміщення, ефективний полярний момент інерції, коефіцієнт демпфування при осьовому русі, коефіцієнт

демпфування при крутильному русі, осьова жорсткість, жорсткість на кручення, початкова осьова швидкість, кутове зміщення долота і швидкість обертання поверхні в радіанах за секунду (RPS).

Осьові та крутильні рівняння руху (1), (2) пов'язані за рахунок сил взаємодії долота [1].

Маючи на увазі значну довжину бурової колони та наявність в її конструкції окремих елементів, крутильні рухи, що виникають у процесі буріння доцільно описати у вигляді сукупності зосереджених мас на валу, окремі частини якого можуть мати свої особливі характеристики. Модель подібної розподіленої системи для, наприклад, двох зосереджених мас може бути представлена у вигляді диференціальних рівнянь руху [2]

$$I_1\ddot{\theta}_1 + (k_1 + k_2)\theta_1 - k_2\theta_2 = 0; \quad (3)$$

$$I_2\ddot{\theta}_2 + (k_2 + k_3)\theta_2 - k_2\theta_1 = 0, \quad (4)$$

де k_i - крутильна жорсткість валу i ($i = 1, 2, 3$), що визначається як

$$k_i = \frac{G_i J_i}{l_i}, \quad (5)$$

де G_i – модуль жорсткості; J_i – полярний момент інерції; l_i – довжина валу; θ - кутове зміщення долота.

Наведені диференціальні рівняння руху в матричній формі мають наступний вигляд

$$\begin{bmatrix} I_1 & 0 \\ 0 & I_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Контактна взаємодія шарошкового долота з гірською породою включає комбінацію динамічних та статичних зусиль, а вібрації, що виникають під час буріння свердловин, складаються з трьох складових: періодичні, ударні та випадкові, що визначаються особливостями структури та текстури матеріалу взаємодії. Розглядаючи простір, зайнятий контактом бурового долота з породою в момент часу t , як дискретну обмежену область Ω , математичну модель контактної взаємодії «бурове долото–порода» можна представити у наступному вигляді [3]

$$m\ddot{u} = p(t) + c(u, \alpha) - f(u, \beta), \quad (7)$$

де m – матриця маси; \ddot{u} – вектор прискорення; t – змінна часу; p – вектор зовнішньої сили; c – контактна сила та вектор тертя; f –

вектор внутрішньої напруги; u – переміщення об'єкта; a – змінна, пов'язана з властивостями контактної поверхні; β – змінна, пов'язана з конститутивним співвідношенням матеріалу.

У роботі [4] представлено модель реагування на буріння шарошkových доліт. Вона включає набір відношень між вагою на біт W , крутним моментом на долоті T , швидкістю проникнення V і кутовою швидкістю Ω . На відміну від моделей, які залежать від точного опису долота, реакція буріння досліджується шляхом об'єднання впливу геометрії долота на кілька параметрів і усереднення параметрів буріння (W, T, V, Ω) протягом принаймні одного оберту долота. У рамках моделі можна отримати кількісну інформацію з даних буріння, пов'язану з властивостями породи, станом долота та ефективністю буріння.

Феноменологічна модель, запропонована Detournay та Defourny [5], враховує, що ріжуча дія фрикційного долота PDC складається як з процесу різання, так і з процесу тертя. При цьому кожен окремий різець відчуває різну величину та напрямок сили, залежно від його розташування на профілі долота (рис. 1) [6].

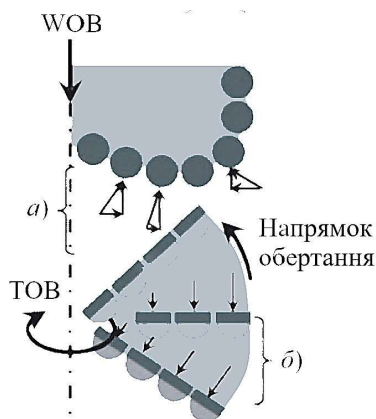


Рис. 1. Величина реактивних сил змінюється залежно від місця розташування різця долота PDC: a – реактивні сили на різці через WOB ; b – реактивні сили на різці через TOB

Рівняння для крутного моменту на долоті T_b відображає момент нелінійного тертя, обумовлений взаємодією породи і долота, що зазнає переривчастого прослизання [6]

$$T_b = D_b W_b [\mu_{cb}(w_b) + (\mu_{sb} - \mu_{cb})e^{-\lambda|w_b|}], \quad (8)$$

де μ_{cb} та μ_{sb} – статичні коефіцієнти сухого та кулонівського тертя; λ – коефіцієнт загасання, рівний 0,9; w_b – кутова швидкість долота.

Таким чином, з наведених результатів виконаних досліджень можна зробити висновок, що в процесі контактної взаємодії бурового долота з гірською породою формуються вібраційні коливання різної амплітуди і частоти як у самому долоті, так і у гірському масиві, які несуть інформативні характеристичні ознаки цієї взаємодії. Для вилучення цієї інформації пропонується використати метод відстеження порядку обертових машин.

Постановка завдання: дослідження методу відстеження порядку обертових машин для визначення параметрів вібрації бурового долота в процесі буріння свердловин.

Вібрації, що виникають на долоті в процесі буріння свердловин, представляють складний коливальний процес

$$X(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A(t) \cos[kw_0(t) + \varphi_k(t)] + \xi_w(t). \quad (9)$$

Він включає накладання на квазіполігармонічний процес - в області низьких та середніх частот, випадкового широкосмугового стаціонарного процесу $\xi_w(t)$ - в області високих частот [7,8].

Відповідна інформація щодо взаємодії долота з гірською породою в процесі буріння свердловин, міститься у височастотній випадковій складовій вібраційного сигналу. Виділення цієї корисної інформації та визначення характеристичних ознак для ідентифікації фізико-механічних характеристик гірської породи здійснюється із використанням спектрального аналізу. Шляхом Фур'є-перетворення визначається спектральна щільність потужності цього сигналу [9]

$$S_T(w) = \frac{1}{T} [H_T(jw)]^2, \quad 0 < t < T, \quad (10)$$

де $H_T(jw) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(w) e^{-jw t}$ - частотне подання сигналу.

З цього сигналу виділялася вузькосмугова компонента $\xi_{\Delta}(t)$ з найбільшою потужністю [7]

$$\xi_{\Delta}(t) = A[1 + mB(t)\cos(w_{\Delta}t + \varphi_0)], \quad (11)$$

де $0 < m < 1$ - глибина модуляції.

У цьому виразі

$$B(t) = \sum_{k=1}^n C_k \cos(k\Omega t + \varphi), \quad (12)$$

тобто представляє амплітудномодульований процес виду

$$\xi(t) = A[1 + \sum_{k=1}^n m_k C_k \cos(k\Omega t + \varphi)] \cdot \cos(\omega_{\Delta} t + \varphi_0), \quad (13)$$

де m_k - парціальний коефіцієнт модуляції; Ω - кутова частота модуляції.

Головним питанням в цій процедурі є визначення ознак за якими виділяється $\xi_{\Delta}(t)$. Від цього залежить наскільки інформація щодо процесу взаємодії долота з гірською породою захищена від впливу різноманітних завад (вібрації інших частин бурової установки, зовнішні процеси у гірському масиві і т. і.).

Ідея запропонованого методу полягає в тому, щоб застосувати формування та аналіз карти порядку обертів обертових частин бурової установки в процесі буріння свердловин для ідентифікації долота у частотній області вимірюваного супутнього інтегрованого вібраційного сигналу як джерела високоамплітудної вібрації.

Існують різноманітні методи відстеження порядку обертових машин. Традиційне відстеження порядку безпосередньо здійснює вибірку аналогового сигналу вібрації з постійним кроком валу Du з використанням аналогових пристроїв. Зазвичай це включає синтезатор відносин і фільтр спостереження згладжування. Частотомір може бути включений для контролю швидкості валу. Синтезатор відносин генерує сигнал, пропорційний швидкості валу машини. Цей вихід використовується для керування частотою вибірки та частотою зрізу аналогового фільтра стеження, фільтра нижніх частот з регульованою частотою зрізу. Після отримання зазначеного блоку даних, відібраних при постійному Du (вибірки кутового домену), обчислюється швидке перетворення Фур'є (ШПФ), у результаті виходить спектр порядку. Пов'язана з цим вартість та складність обладнання обмежують його використання. Аналоговий підхід також схильний до помилок: відомо, що обладнання, що використовується, має проблеми з відстеженням швидко мінливих швидкостей валу [10].

Широке поширення, головним чином для визначення несправностей машин і механізмів, знайшли: метод відстеження обчисленого порядку (СОТ), метод на основі фільтра Вольда-Калмана (VKF-ОТ), метод з використанням перетворення Габора, метод перетворення відстеження порядку та ін.

СОТ по суті полягає в перетворенні сигналу часової області, відібраного за теоремою про вибірку Шеннона-Найквіста, у сигнал кутової області. Обладнання збирає сигнал імпульсу швидкості осі з однаковим інтервалом часу для

обчислення рівного кутового часу, потім алгоритм інтерполяції використовується для інтерполяції та підгонки часу повторної дискретизації для отримання остаточного сигналу кутової області [11].

Формула розрахунку коефіцієнта порядку I виводиться з формули для розрахунку швидкості

$$I = 60f/n_0, \quad (14)$$

де f - частота вібрації; n_0 - швидкість.

Повторна вибірка в кутовій області для СОТ подібна до дискретизації сигналу в часовій області

$$Q_s \geq 2 \times Q_{max}. \quad (15)$$

де Q_s - частота дискретизації порядку; Q_{max} - максимальний порядок.

Максимальний порядок сигналу може бути обмежений фільтрацією низьких частот, а найвищий порядок визначається частотою зрізу f_c фільтра низьких частот. Таким чином, відповідно до максимальної n_{max} і мінімальної швидкості n_{min} опорного валу для розрахунку Q_{max}

$$f_c = n_{max} \times Q_{max}/60, \quad (16)$$

$$Q_{max} = 60 \times f_c/n_{min}. \quad (17)$$

Кутову частоту дискретизації можна розрахувати з максимального порядку сигналу. Якщо вісь відліку рівноприскорена протягом короткого проміжку часу, кут повороту θ можна представити виразом

$$\theta(t) = b_0 + b_1 + b_2 t^2, \quad (18)$$

де b_0 , b_1 , b_2 - невідомі коефіцієнти, які необхідно обчислити.

Щоб вирішити цю задачу потрібні три послідовні імпульси t_1 , t_2 , t_3 . Відповідно кут становить θ_1 , θ_2 , θ_3 , різниця фаз між двома точками якої дорівнює $\Delta\theta$. Використовуючи такий підхід можна отримати рівний кутовий час t_i під будь-яким кутом [11]

$$t_i = \frac{1}{2b_2} \left[\sqrt{4b_2(\theta_i - b_0) + b_1^2} - b_1 \right], \quad (21)$$

де t_i - часовий ряд, отриманий від повторної вибірки кутової області.

Тобто цей процес є обчисленням рівного кутового часу. Метод потребує інтерполяції часових рядів рівних кутів, щоб отримати повторно дискретизований сигнал. Обмеженням застосування цього методу є кінцева роздільна здатність порядку. Це спричиняє проблеми, коли порядки не потрапляють на спектральні лінії.

Метод VKF-OT спирається на рівняння даних та структурне рівняння. Рівняння даних фільтра Вольда-Калмана другого покоління для фільтрації одного порядку визначається як [12]

$$y(n) = x(n)e^{j\theta(n)} + \eta(n), \quad (22)$$

де $y(n)$ - виміряні дані, $x(n)$ - комплексна огинаюча відфільтрованого сигналу, $e^{j\theta(n)}$ - комплексна несуча хвиля.

$$\theta(n) = \sum_{i=1}^n w(i) \Delta t, \quad (23)$$

де $w(i)$ - дискретна кутова частота; $\eta(n)$ - випадковий шум та інші компоненти порядку, або помилка.

Структурне рівняння забезпечує гладкість послідовних цифрових точок відфільтрованих даних, підганяючи поліном низького порядку послідовності $x(n)$. Ця умова забезпечується за допомогою структурного рівняння з невідомим членом неоднорідності $\varepsilon(n)$ у правій частині рівняння. Порядок полінома означає кількість полюсів фільтра. Наприклад, структурне рівняння для двополюсного фільтра визначається як [12]

$$x(n) - 2x(n+1) + x(n+2) = \varepsilon(n) \quad (24)$$

Цей метод дозволяє вилучати близькі порядки, та такі, що перетинаються, в системах з декількома валами і відрізняється більш високою роздільною здатністю по частоті і порядку, ніж звичайні методи. Однак слід мати на увазі, що оскільки метод VKF-OT вимагає більшого часу розрахунку, він мало підходить для обробки у реальному часі.

При виділенні порядку сигналу на основі перетворення Габора центральна частота зазвичай визначається методом лінійної інтерполяції. На цій основі смугу пропускання фільтра визначається рівночастотним або рівнопорядковим методом. Якщо q -та центральна частота $f_q(t)$ і рівночастотна смуга частот Δf є константою, околиці фільтрації можуть бути представлені рівнянням [13]

$$f_q(t) \pm \frac{\Delta f}{2} = \left[f_q(t) - \frac{\Delta t}{2}, f_q(t) + \frac{\Delta t}{2} \right]. \quad (25)$$

Смуга пропускання рівного порядку Δo змінюється залежно від центральної частоти фільтра та її відношення до центральної частоти $f_q(t)$ є константою. Околиці фільтрації методу рівного порядку можна представити за допомогою рівняння [13]

$$\begin{cases} f_q(t) \pm \frac{\Delta f}{2} = \left[\left(q - \frac{\Delta o}{2} \right) \times f_1(t), \left(q + \frac{\Delta o}{2} \right) \times f_1(t) \right] \\ \Delta f = \Delta o \times f_1(t) \end{cases} \quad (26)$$

Потім за допомогою алгоритму маскуванню отримується коефіцієнт Габора відповідного порядку в сигналі. Алгоритм полягає у встановленні двійкового маскуючого масиву з тим самим розміром, що й $C_{m,n}^q$, відповідно до околиці фільтрації, що змінюється в часі, тоді підмножина коефіцієнта Габора виділяється відповідно до операції рівняння

$$C_{m,n}^q = \begin{cases} C_{m,n}, & \Phi_{m,n} = 1, \\ 0, & \Phi_{m,n} = 0. \end{cases} \quad (27)$$

Метод, заснований на перетворенні Габора, вимагає менше часу для реалізації в порівнянні з методом VKF-OT, але при цьому поступається йому в точності.

Перетворення відстеження порядку – це математичні перетворення, які за один крок виконують як відстеження порядку (синхронізацію домену сигналу з опорним валом), так і перетворення Фур'є для оцінки амплітуди та фази кожного порядку отриманого таким чином спектру. За допомогою таких перетворень можна безпосередньо оцінити амплітуду синхронних, субсинхронних або суперсинхронних синхронізованих гармонік без додаткового етапу передискретизації. Прикладом формулювання таких перетворень є швидкісне синхронне дискретне перетворення Фур'є, що визначається таким чином [14]

$$X(\Omega) = \frac{\Delta t}{\Theta} \sum_{n=1}^N x(n\Delta t) e^{-j\Omega\theta(n\Delta t)} w(n\Delta t), \quad (28)$$

де Ω - порядок гармонік, які потрібно оцінити, Θ - повний кутовий поворот валу у вікні збору, θ та w - миттєве кутове обертання і швидкість опорного валу.

Відомі й інші методи відстеження порядку машин, що обертаються, кожен з яких має свої переваги і недоліки. Очевидно, що вибір

конкретного з них залежить від особливостей та умов розв'язуваного завдання.

Для аналізу сигналів вібрації долота в процесі буріння свердловин у залізорудному масиві використаний метод COT із застосуванням функцій Matlab з додатковою передискретизацією для підвищення його роздільної здатності [15].

Відповідно до застосованого методу сформовано карту частоти обертів для даних вібрації в процесі зміни робочого режиму бурової установки (підвищення впродовж 40 секунд частоти обертів приводу з 500 до 2150 обертів за хвилину (рис. 2).

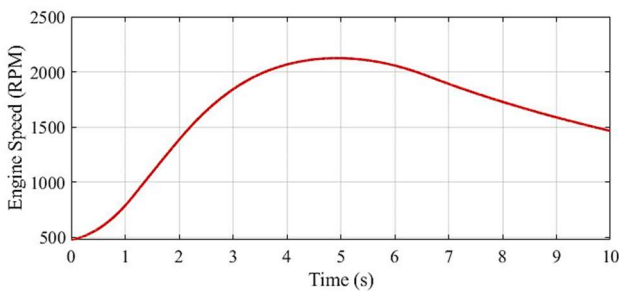


Рис. 2. Зміна робочого режиму бурової установки.

На рис. 3 наведена отримана карта порядку обертових частин бурової установки

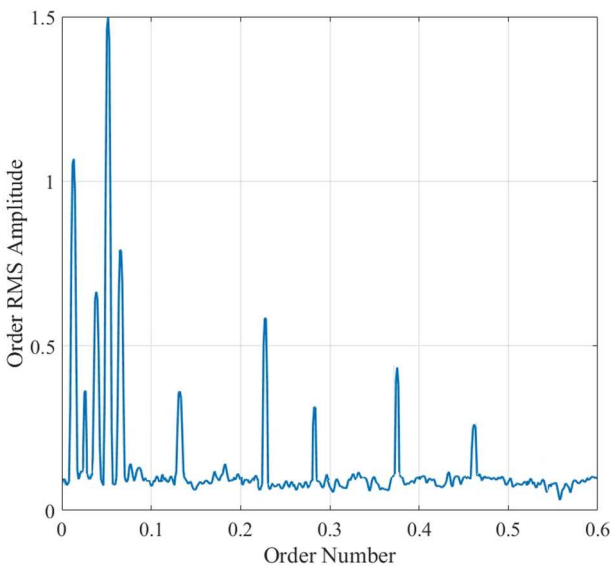


Рис.3. Карта порядку обертових частин бурової установки

На рис. 4 наведено результати виділення у часовій області із загального вібраційного сигналу порядкової складової на долоті впродовж зміни робочого режиму бурової установки, що стосується трьох типів залізної руди.

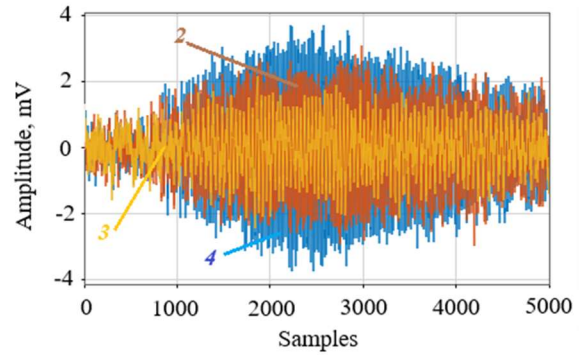


Рис. 4. Порядкові сигнали на долоті, що відповідають трьом типам залізної руди

В таблиці наведено статистичні характеристики порядкових сигналів на долоті, що відповідають трьом типам залізної руди: Mean – середнє значення; Median – медіанне значення; RMS – середньоквадратичне значення; STD – стандартне відхилення; VAR – дисперсія).

Таблиця

Параметри аналізованого сигналу вібрації бурової установки у часовій області

Параметр	Mean	Median	RMS	STD	VAR
Сигнал 1	1.334	1.3701	1.4556	0.6072	0.3687
Сигнал 2	0.9736	0.9996	1.0716	0.4477	0.2004
Сигнал 3	0.6180	0.6155	0.6819	0.2881	0.0830

Аналіз виконаних експериментальних досліджень та моделювання процесу взаємодії долота з гірською породою дозволяє зробити висновок про те, що отримані статистичні показники супутнього вібраційного сигналу дійсно адекватно характеризують процес буріння свердловин.

Слід відмітити виражену залежність характеристик отриманих вібраційних сигналів від вмісту оксидів заліза Fe₂O₃+FeO. Так, наведені у таблиці дані відповідають залізній руді із вмістом Fe₂O₃+FeO 42,2, 23,5, 16,5 (%), а загальна кореляція RMS отриманих сигналів з цим показником становить 81-85 для руд з різним мінералогічним складом. Це можна пояснити переважною твердістю і міцністю зазначених складових над іншими. Разом з тим, слід зазначити, що, за умов різноманіття мінерального складу та текстурно-структурних особливостей залізної руди, використання тільки наведених параметрів вібраційного сигналу недостатньо для надійного визначення її мінералого-технологічних різновидів.

Висновки. В процесі енергоємної контактної взаємодії бурового долота з гірською породою формуються вібраційні коливання різної амплітуди і частоти як у самому долоті, так і у гірському масиві, які несуть інформативні характеристичні ознаки цієї взаємодії. Проблемним питанням є виділення корисної складової вібраційного сигналу з різноманітних завад (вібрації інших частин бурової установки, зовнішні процеси у гірському масиві і т. і.). Для вилучення цієї інформації використаний метод відстеження обчисленого порядку (COT) обертових машин із застосуванням функцій Matlab з додатковою передискретизацією для підвищення його роздільної здатності. Запропонований підхід полягає в тому, що в процесі зміни робочого режиму приводу обертових частин бурової установки формують карту порядку в усьому діапазоні його обертів, визначають частоту високоамплітудної вібрації долота, яка відповідає визначеному піковому порядку обертів, і на цій частоті вимірюють статистичні параметри змін амплітуди вимірюваного сигналу.

Аналіз виконаних експериментальних досліджень та моделювання процесу взаємодії долота з гірською породою дозволяє зробити висновки про те, що отримані із застосуванням зазначеного методу статистичні показники супутнього вібраційного сигналу дійсно адекватно характеризують процес буріння свердловин. Однак використання тільки визначених параметрів вібраційного сигналу недостатньо для надійного визначення фізико-механічних характеристик та мінералого-технологічних різновидів залізо-вмісної гірської породи.

Напрямом подальших досліджень є визначення найкращої комбінації характеристичних ознак процесу взаємодії бурового долота з гірською породою при бурінні свердловин та інтелектуальних методів оброблення отриманої інформації [16,17].

Л і т е р а т у р а

- Sharma, A. Al Dushaishi, M. Nygaard, R. Fixed bit rotary drilling failure criteria effect on drilling Vibration. *ARMA 21–2083*. 2021. https://www.researchgate.net/publication/349537048_Fixed_bit_rotary_drilling_failure_criteria_effect_on_drilling_vibration.
- Dukkipati, R. Solving Vibration Analysis Problems Using MATLAB. *New Age International*. 2007. ISBN 10: 8122420648 - ISBN 13: 9788122420647.
- Liu, X., Kou, H., Ma, X., He, M. Investigation of the Rock-Breaking Mechanism of Drilling under Different Conditions Using Numerical Simulation. *Applied Sciences*. 2023. 13(20):11389. <https://doi.org/10.3390/app132011389>.
- Franca, L. F. P. Drilling Action of Roller-Cone Bits: Modeling and Experimental Validation. *ASME. J. Energy Resour. Technol.* 2011. 132(4): 043101. <https://doi.org/10.1115/1.4003168>.
- Detournay, D., Defourny, P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits. *International Journal of Rock Mechanics and Geomechanics*, 29(1), 1992. 13–23. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)91041-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)91041-3).
- Patil, P. A., Teodoriu, C. Analysis of Bit–Rock Interaction During Stick–Slip Vibration Using PDC Cutting Force Model. *OIL GAS European Magazine*, 3, 2013. 124-129. <https://www.researchgate.net/publication/271192233>.
- Егамбердієв, І.П. *Методи оцінки технічного стану бурових верстатів*. Навої: вид-во ім. Алішер Навої. 2019. ISBN 978-9943-5884-4-8.
- Franca, L. F. P. Drilling Action of Roller-Cone Bits: Modeling and Experimental Validation. *ASME. J. Energy Resour. Technol.* 2011. 132(4): 043101. <https://doi.org/10.1115/1.4003168>.
- 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>.
- Wang, K. S., Heyns, S. Vold-Kalman Filter Order Tracking in Vibration Monitoring of Electrical Machines. *Journal of Vibration and Control*, 2009. 15(9),1325-1347. DOI:10.1177/1077546308094431.
- Jia, G., Guo, F., Wu, Z., Cui, S., Yang, J. A noise reduction method for multiple signals combining computed order tracking based on chirplet path pursuit and distributed compressed sensing. *Structural Durability & Health Monitoring*, 17(5), 2023. 383-405. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2023.026885>.
- Wang, K. S., Heyns, P. S. Application of computed order tracking, Vold-Kalman filtering and EMD in rotating machine vibration, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(2), 2011. 416-430.
- Wang, T., Zhang, L., Qiao, H. and Wang, P. Fault diagnosis of rotating machinery under time-varying speed based on order tracking and deep learning. *Journal of Vibroengineering*, 22 (2), 2020. 366-382, <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20784>.
- Borghesani P., Pennacchi P., Chatterton S., Ricci R. The velocity synchronous discrete Fourier transform for order tracking in the field of rotating machinery, *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2013.03.026>.
- Brandt, A. *Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures*. Chichester, UK: John Wiley & Sons. 2011. URL: <http://surl.li/tyves>.
- Morkun, V.S., Morkun, N.V., Tron, V.V., Serdiuk, O.Y., Haponenko, A. Use of backscattering ultrasound parameters for iron ore varieties

recognition. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 2023. с. 19-24. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-6/019>.

17. Morkun, V., Fischerauer, G., Morkun, N., Tron, V., Haponenko, A. Determining Rock Varieties on The Basis of Fuzzy Clustering of Ultrasonic Measurement Results. *CEUR Workshop Proceedings*, 3156, 2022. 274-283.

References

- Sharma, A. Al Dushaishi, M. Nygaard, R. Fixed bit rotary drilling failure criteria effect on drilling Vibration. - *ARMA 21-2083*. 2021. https://www.researchgate.net/publication/349537048_Fixed_bit_rotary_drilling_failure_criteria_effect_on_drilling_vibration.
- Dukkipati, R. Solving Vibration Analysis Problems Using MATLAB. *New Age International*. 2007. ISBN 10: 8122420648 - ISBN 13: 9788122420647.
- Liu, X., Kou, H., Ma, X., He, M. Investigation of the Rock-Breaking Mechanism of Drilling under Different Conditions Using Numerical Simulation. *Applied Sciences*. 2023. 13(20):11389. <https://doi.org/10.3390/app132011389>.
- Franca, L. F. P. Drilling Action of Roller-Cone Bits: Modeling and Experimental Validation. *ASME. J. Energy Resour. Technol.* 2011. 132(4): 043101. <https://doi.org/10.1115/1.4003168>.
- Detournay, D., Defourny, P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits. *International Journal of Rock Mechanics and Geomechanics*, 29(1), 1992. 13-23. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)91041-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)91041-3).
- Patil, P. A., Teodoriu, C. Analysis of Bit-Rock Interaction During Stick-Slip Vibration Using PDC Cutting Force Model. *OIL GAS European Magazine*, 3, 2013. 124-129. <https://www.researchgate.net/publication/271192233>.
- Ehamberdiiev, I.P. Metody otsinky tekhnichnoho stanu burovnykh verstativ. Navoi: vyd-vo im. Alisher Navoi. 2019. ISBN 978-9943-5884-4-8.
- Franca, L. F. P. Drilling Action of Roller-Cone Bits: Modeling and Experimental Validation. *ASME. J. Energy Resour. Technol.* 2011. 132(4): 043101. <https://doi.org/10.1115/1.4003168>.
- 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>.
- Wang, K. S., Heyns, S. Vold-Kalman Filter Order Tracking in Vibration Monitoring of Electrical Machines. *Journal of Vibration and Control*, 15(9), 2009. 1325-1347. DOI:10.1177/1077546308094431.
- Jia, G., Guo, F., Wu, Z., Cui, S., Yang, J. A noise reduction method for multiple signals combining computed order tracking based on chirplet path pursuit and distributed compressed sensing. *Structural*

Durability & Health Monitoring, 17(5), 2023. 383-405. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2023.026885>.

- Wang, K. S., Heyns, P. S. Application of computed order tracking, Vold-Kalman filtering and EMD in rotating machine vibration, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(2), 2011. 416-430.
- Wang, T., Zhang, L., Qiao, H. and Wang, P. Fault diagnosis of rotating machinery under time-varying speed based on order tracking and deep learning. *Journal of Vibroengineering*, 22 (2), 2020. 366-382, <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20784>.
- Borghesani P., Pennacchi P., Chatterton S., Ricci R. The velocity synchronous discrete Fourier transform for order tracking in the field of rotating machinery, *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2013.03.026>.
- Brandt, A. *Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures*. Chichester, UK: John Wiley & Sons. 2011. URL: <http://surl.li/tyves>.
- Morkun, V.S., Morkun, N.V., Tron, V.V., Serdiuk, O.Y., Haponenko, A. Use of backscattering ultrasound parameters for iron ore varieties recognition. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 2023. с. 19-24. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-6/019>.
- Morkun, V., Fischerauer, G., Morkun, N., Tron, V., Haponenko, A. Determining Rock Varieties on The Basis of Fuzzy Clustering of Ultrasonic Measurement Results. *CEUR Workshop Proceedings*, 3156, 2022. 274-283.

Morkun V.S., Morkun N.V., Porkuian O.V., Hryshchenko S.M., Bobrov E.Yu., Hryshchenko Ya.O. Determination of the vibration parameters of a drilling rig using the method of computed order tracking of rotating machines

The aim of the study is to determine the vibration parameters of a drilling rig during well drilling using the method of tracking the order of rotating machines. The paper uses methods of analyzing domestic and foreign experience, methods of mathematical modeling, as well as methods of mathematical statistics and probability theory to form an assessment of the research results. The scientific novelty is to substantiate the use of the method of tracking the calculated order of rotating machines to determine the frequency at which it is advisable to measure the statistical parameters of the accompanying vibration signal. The practical significance lies in determining the procedure for measuring the parameters of the vibration signal of a drilling rig to assess the physical and mechanical properties of rock directly during well drilling. To extract the useful component of the vibration signal on the drill bit from various interferences (vibrations of other parts of the drilling rig, external processes in the rock mass, etc.), the method of tracking the computed order (COT) of rotating machines with additional oversampling to increase its resolution is used. The proposed approach consists in the fact that in the process of

changing the operating mode of the drive of the rotating parts of the drilling rig, an order map is formed over the entire range of its rotation, the frequency of high-amplitude vibration of the bit corresponding to the determined peak order of rotation is determined, and at this frequency, the statistical parameters of changes in the amplitude of the measured signal are measured. In accordance with the applied method, a speed map was generated for the vibration data in the process of changing the operating mode of the drilling rig (increasing the drive speed from 500 to 2150 rpm within 40 seconds) Analysis of the experimental studies and modeling of the interaction of the bit with iron-containing rock allows us to conclude that the statistical parameters of the accompanying vibration signal obtained using this method really adequately characterize the process of well drilling.

Keywords: well drilling, vibration, order tracking, signs.

Моркун Володимир Станіславович – д-р техн. наук, проф., професор Криворізького національного університету (Кривий Ріг), morkunv@gmail.com.

Моркун Наталя Володимирівна – д-р техн. наук, проф., професор Львівський національний університет імені Івана Франка (Львів), nmorkun@gmail.com.

Поркуян Ольга Вікторівна – д-р техн. наук, проф., ректор Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), porkuyan@snu.edu.ua.

Грищенко Світлана Миколаївна – к.пед.н., старший дослідник, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного податкового університету (Ірпінь), smgrischenko@gmail.com.

Бобров Євген Юрійович – аспірант Криворізького національного університету (Кривий Ріг), smgrischenko@gmail.com.

Грищенко Ярослав Олександрович – аспірант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), grischenckokgtl@gmail.com.