

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТАХ З МЕТОЮ КОНТРОЛЮ ДИНАМІКИ РОЗВИТКУ ДЕФЕКТІВ ЇХ РОБОЧИХ КОЛІС ТА МІЖСТУПІНЧАТИХ УЩІЛЬНЕНЬ

Ю.В. Паньків

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 727170,
e-mail: ktsu@pung.edu.ua

У статті вказано на необхідність розробки та впровадження нових методів та засобів контролю, яка зумовлена значним зносом парку відцентрових насосів систем підтримання пластового тиску на нафто-промислах України та, відповідно, зростанням витрат на їх планово-попереджувальні ремонти, що робить поставлені в роботі задачі актуальними. Обґрунтовано можливість застосування частотно-часових розподілів енергії вібросигналу, зокрема частотно-часового розподілу Вігнера-Вілля для детального аналізу вібраційних процесів у відцентрових насосних агрегатах при наявності складних коливань в частотних спектрах вібросигналів, отриманих з їх вузлів. В результаті проведених досліджень побудовано просторові картини розподілу енергії вібросигналу, записаного в момент пуску агрегату типу ЦНС-180-1900 за допомогою частотно-часового розподілу Вігнера-Вілля та доведено можливість їх використання для пошуку дефектів робочих коліс та міжступінчатих ущільнень відцентрових насосних агрегатів на початкових стадіях їх розвитку.

Ключові слова: частотно-часовий розподіл, технічний стан, технічна діагностика, відцентровий насосний агрегат, підтримання пластового тиску, відмови, дефекти, діагностична ознака.

В статті вказано на необхідність розробки та впровадження нових методів та засобів контролю, яка зумовлена значним зносом парку центробежних насосів систем підтримання пластового тиску на нафто-промислах України та, відповідно, зростанням витрат на їх планово-попереджувальні ремонти, що робить поставлені в роботі задачі актуальними. Обґрунтовано можливість застосування частотно-часових розподілів енергії вібросигналу, зокрема частотно-часового розподілу Вігнера-Вілля для детального аналізу вібраційних процесів у відцентрових насосних агрегатах при наявності складних коливань в частотних спектрах вібросигналів, отриманих з їх вузлів. В результаті проведених досліджень побудовано просторові картини розподілу енергії вібросигналу, записаного в момент пуску агрегату типу ЦНС - 180-1900 з допомогою частотно-часового розподілу Вігнера-Вілля та доведено можливість їх використання для пошуку дефектів робочих коліс та міжступінчатих ущільнень відцентрових насосних агрегатів на початкових стадіях їх розвитку.

Ключевые слова: частотно-временное распределение, техническое состояние, техническая диагностика, центробежный насосный агрегат, поддержание пластового давления, отказы, дефекты, диагностический признак.

The article deals with the need of development and introduction of new control methods and means caused by a significant deterioration of the centrifugal pumps stock of the formation pressure maintenance systems at Ukrainian oil fields and, thus by cost increase for their planned and preventive maintenance which makes the study objectives more relevant. The possibility of using time-and-frequency vibration signal energy distributions, including time-and-frequency Wigner and Ville's distribution for detailed analysis of vibration processes of centrifugal pumping units with complex oscillations in the frequency spectrum of vibration signals, generated by their parts, has been grounded. The spatial energy distribution patterns of vibration signal, which was recorded at the time of the CNS-180-1900 type unit start with the help of the Wigner and Ville's time-and-frequency distribution have been built in the result of the conducted study. The possibility of their utilization for defect finding of centrifugal pump unit impellers and interstage seals on the early stages of their development has also been proved in the result of the conducted study.

Keywords: time-and-frequency distribution, technical state, technical diagnostics, centrifugal pumping unit, formation pressure maintenance, breakdowns, defects, diagnostic indicator.

Розроблення нових ефективних методів контролю технічного стану відцентрових насосних агрегатів (ВНА) систем підтримання пластового тиску (ППТ) є важливою задачею, оскільки способом заводнення продуктивних пластів в Україні видобувається значна частина всієї нафти, а якість їх експлуатації, на жаль, ще залишається не дуже високою. Існуюча система планово-попереджувальних ремонтів (ППР) не дає змоги повністю використати ресурс, закладений у ВНА.

Сьогодні все більш широкого промислового застосування набувають методи та засоби вібродіагностики. Застосування віброакустичних методів є найбільш оптимальним варіантом з точки зору ефективності та простоти процедури проведення контролю, оскільки буде використовуватися лише один інформативний параметр – вібрація ВНА, за зміною якої можна визначати практично усі поширені дефекти.

Проте, на даний час практично відсутні спеціально розроблені методи діагностування

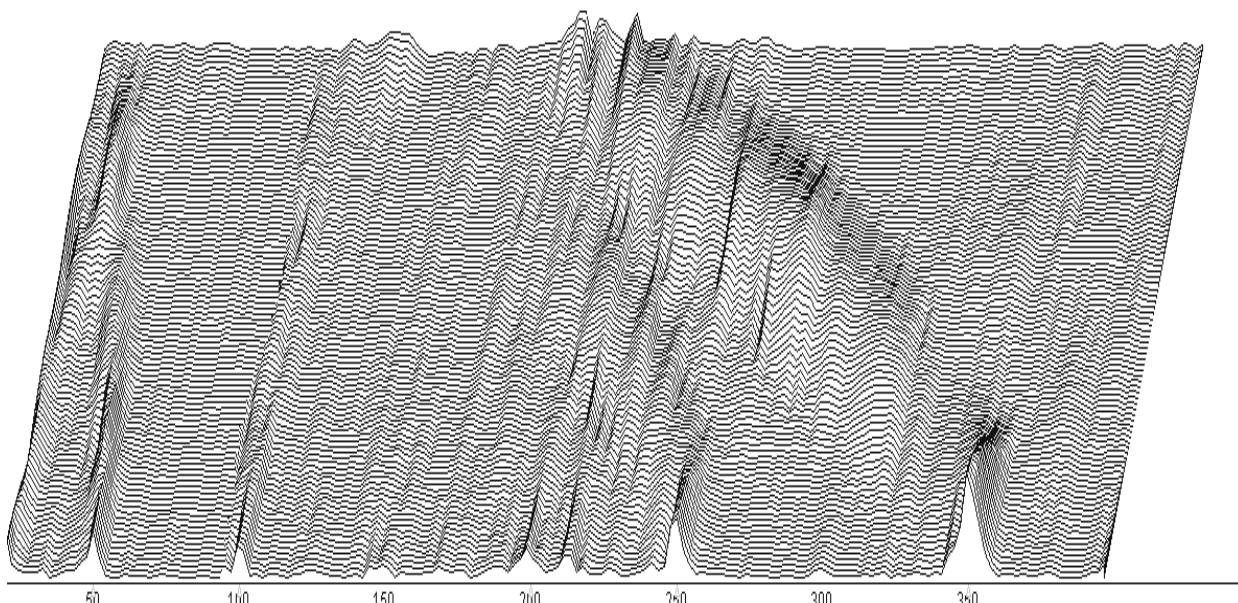


Рисунок 1 – Просторова розгортка послідовних спектральних реалізацій віброцигналу, записаного в місці розташування 1-го підшипника ВНА

елементів і вузлів ВНА, що застосовуються в системах підтримання пластового тиску (ППТ) та штатні системи для їх реалізації. В процесі діагностування ВНА з використанням віброакустичних методів все ще застосовуються стандартні методи, зокрема побудова спектру віброцигналу за допомогою швидкого перетворення Фур'є, яке дає змогу оцінити загальний стан агрегату та виявити його типові дефекти.

Однак такі дефекти, як шорсткість, або величина зношення поверхонь робочих коліс, направляючих апаратів та стан міжступінчастих і торцевих ущільнень насосного агрегату майже не проявляються на частотному спектрі його віброцигналів. В роботі [1] вказувалось на можливу наявність взаємозв'язку між рівнем вібрації та ККД насосного агрегата типу ЦНС-180-1900, але на картині частотного спектру такі зміни важко відслідковувати, у зв'язку з чим було здійснено спробу використати досконаліші методи аналізу вібраційних сигналів для виявлення таких дефектів (зношення ущільнень).

Оскільки вплив даних дефектів найяскравіше проявляється при критичних режимах роботи ВНА, зокрема при його пуску в експлуатацію, коли навантаження на ротор за короткий час змінюється від нуля до максимального значення, тому з метою встановлення впливу стану поверхонь робочих коліс, направляючих апаратів (величини їх зношення) та міжступінчастих ущільнень на ККД відцентрового насосного агрегату було проведено ряд експериментів, в процесі яких реєструвалися віброакустичні коливання за допомогою вібродавачів, розміщених на корпусі підшипників ВНА під час запускання його в роботу.

Попередній аналіз побудованої просторової розгортки послідовних реалізацій частотних спектрів (рис. 1) свідчить, що вона має досить низьку роздільну здатність та є малоінформативною, оскільки дає змогу лише приблизно

оцінити характер зміни перехідного процесу, що має місце в момент запуску ВНА і ній недостатньо чітко видно перерозподіл рівнів вібрації, тому проблема розроблення нових методів віброакустичного контролю технічного стану агрегатів, що забезпечуватимуть вищу точність за рахунок використання сучасних методів обробки інформації залишається актуальною.

Як правило, одновимірний аналіз віброакустичних сигналів, які відносяться до нестационарних випадкових процесів, лише в часовій або частотній областях не забезпечує достатньої кількості інформації для прийняття заключення стосовно досліджуваного процесу. Вказані обставини сприяли розвитку більш складного методу аналізу вказаних процесів, що отримав назву – короткочасне перетворення Фур'є (КПФ), що дає можливість представляти досліджувані процеси в координатах частота-час [2]. В той же час спектрограми не дають змоги повною мірою забезпечити точне вимірювання характеристик швидкоплинних процесів, оскільки зменшення розміру часового вікна для локалізації швидкої зміни сигналу, призводить до неминучого зниження роздільної здатності уздовж лінії його миттєвих частот.

На рис. 2 зображено спектрограму того ж віброцигналу, з якої видно, що до моменту пуску ЦНС-180-1900 (на інтервалі 0-12 сек) у спектрі присутні гармоніки на частотах 50, 200 та 250 Гц з незначною амплітудою, поява яких зумовлена роботою маслососа, що був запущений за 10-20 хвилин перед запуском агрегату. Також в діапазоні до 50 Гц спостерігався незначний низькочастотний шум. В момент часу, рівний 11-12 с було проведено запуск агрегату. Як видно з рис. 2, електродвигун вийшов на сталий режим роботи приблизно за 0.6-1.0 с (до моменту появи на спектрограмі чіткої гармоніки на частоті 350 Гц – першої лопаткової гармоніки).

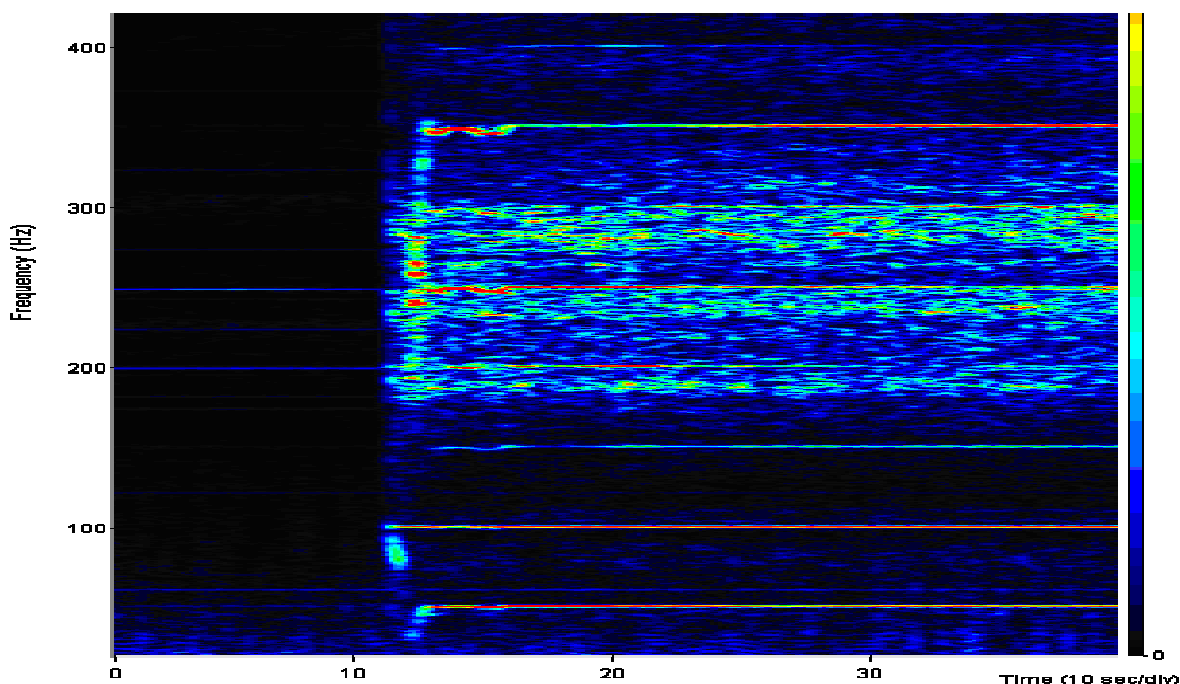


Рисунок 2 – Спектрограма вібросигналу з 1-го підшипника ВНА

Проте роздільна здатність на спектрограмі за часом також є досить низькою, що зумовлено обмеженою при проведенні експериментів до 48 кГц частотою дискретизації.

Виходячи з наведеного вище, можна стверджувати, що для швидкоплинних (які змінюються одночасно за часом і за частотою) віброакустичних сигналів, потрібно використовувати більш складні та досконаліші методи їх аналізу. Одним із перспективних напрямків в даному випадку є застосування частотно-часових розподілів (ЧЧР), як доповнення до аналізу частотних спектрів та спектрограм вібросигналів. Можна назвати, як мінімум, дві причини для переходу від класичного аналізу спектру вібросигналу та подібних йому методів до методів частотно-часової розгортки сигналу (ЧЧРС). По-перше, для стаціонарних сигналів, особливо швидкоплинних, аналіз їх зміни в часі у поєднанні із частотним аналізом, як правило, є досить дуже корисним при встановленні точного діагнозу дефектів. Наприклад, вібросигнал, записаний з вібродавача, розташованого на зубчатій коробці передач, може бути промодульований з використанням як амплітудної, так і частотної модуляції. Дефекти та пошкодження несучих підшипників та зубчатих передач агрегата генерують періодично повторювані імпульси у вібросигналах. Ці сигнали, як правило, пов'язані з періодом обертання ротора. По-друге, для нестационарних сигналів, наприклад, що генеруються ротором, швидкість обертання якого під час запуску і зупинки, як правило, змінюється так швидко, що методи, засновані на швидкому перетворенні Фур'є, не можуть бути використані.

Засновниками теорії ЧЧР вважають Класена і Мекленбрука [3], які вперше реалізували його на практиці в сфері обробки радіосигна-

лів. Надалі Л. Коен у роботі [4] зумів узагальнити існуючі погляди на формування білінійних представлень розподілу щільності енергії в частотно-часовому просторі і отримати єдиний унітарний опис всіх потенційно можливих ЧЧР. Подальше дослідження властивостей сумісних частотно-часових представлень дозволило йому виділити їх характерні ознаки і таким чином визначити підходи до формування нових форм білінійних ЧЧР, так званих розподілів класу Коена. Значного розвитку теорія частотно-часового аналізу отримала завдяки роботам О. Алексєєва [5,6], що зумів не тільки ефективно використовувати відомі методи сумісної частотно-часової обробки радіосигналів у багатьох практичних додатках радіомоніторингу, але і отримати принципово нові наукові результати в даній області.

У класі частотно-часових описів Коена [4] розподіл Вігнера визначається як потужний інструмент обробки сигналів, що дає змогу вимірювати їх параметри навіть в тих випадках, коли вони зазнають істотних змін на інтервалі аналізу. У теоретичному плані головною перевагою використання функції Вігнера є те, що сформовані на її основі розподіли володіють властивістю максимальної локалізації сигнальної енергії в континуумі точок миттєвих частот окремих компонент, в загальному випадку, складного (багатокомпонентного) процесу. У цьому сенсі ЧЧР Вігнера є базовим серед всіх можливих білінійних частотно-часових описів класу Коена. У [4] показано, що функція Вігнера може виступати як базовий розподіл, оскільки решта всіх можливих частотно-часових представлень, можуть бути представлені в тій чи іншій мірі його згладженими варіаціями. У аналоговій формі білінійний ЧЧР Вігнера описується функцією вигляду:

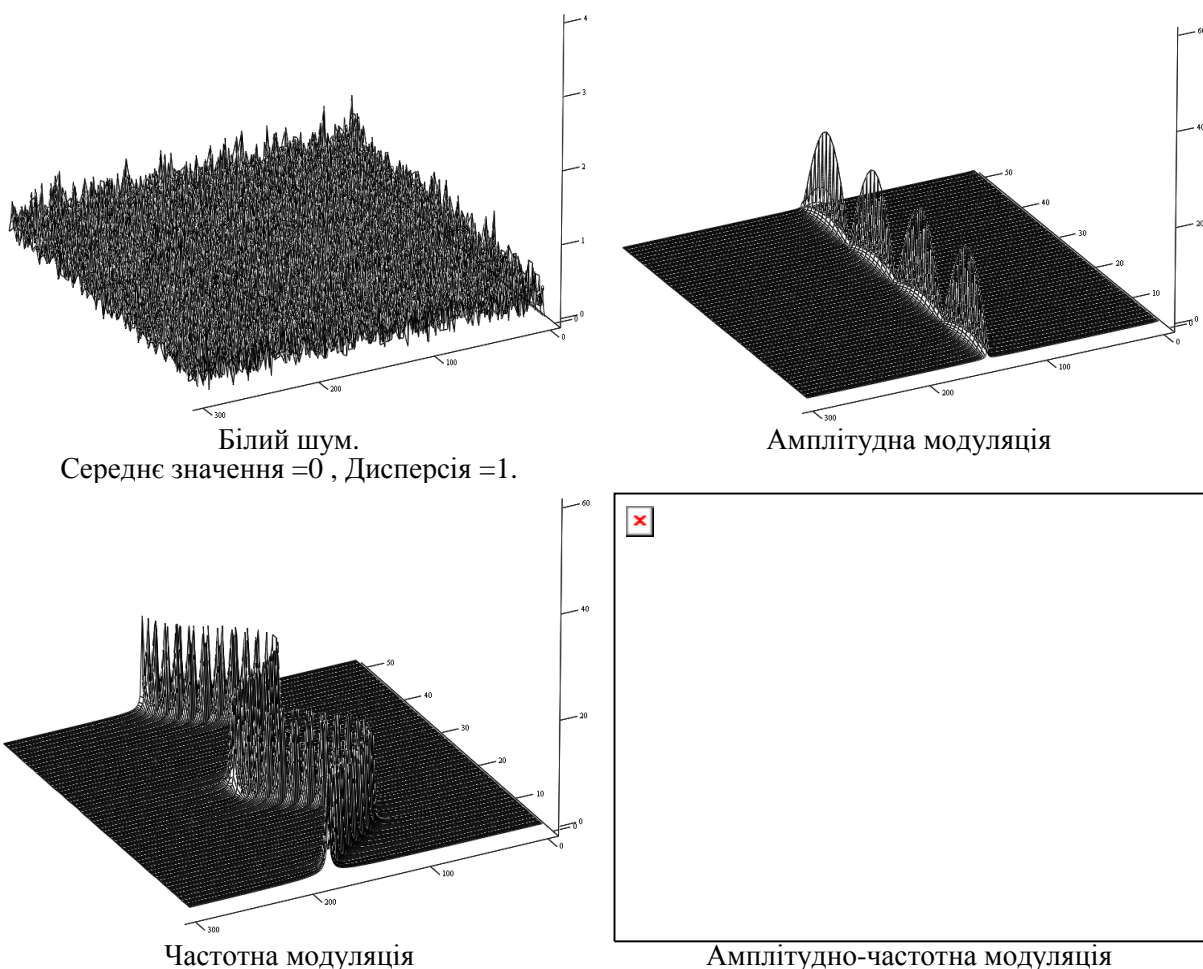


Рисунок 3 – Приклади розподілу Вігнера для простих сигналів

$$\rho_w(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} z_a\left(\frac{t+\tau}{2}\right) \cdot z_a^*\left(\frac{t-\tau}{2}\right) \cdot e^{-2\pi f\tau} d\tau, \quad (1)$$

де $z_a(t) = z(t) + j\tilde{z}(t)$ — аналітичне представлення сигналу;

$z(t)$ — дійсна частина сигналу кінцевої енергії;

$\tilde{z}(t)$ — уявна частина сигналу, пов'язана із $z(t)$ за допомогою перетворення Гільберта. Розподіл вигляду (1) з математичної точки зору можна трактувати як спектральний розклад функції автокореляції сигналу.

Серед поширених варіантів ЧЧР, зокрема ЧЧР Ріхачека, Чої-Вільямса, Вігнера-Вілля та інших [3,7,8,9,11], було прийнято рішення використати для аналізу експериментальних даних ЧЧР Вігнера-Вілля, виходячи з того, що даний ЧЧР забезпечує найвищу роздільну здатність на частотно-часовій площині та є більш простим в обчисленні порівняно з іншими (наприклад з розподілом Чої-Вільямса) [7]. Цей розподіл є потужним інструментом для частотного аналізу часових сигналів, він може інтерпретуватися як розподіл енергії сигналу як в частотному, так і часовому інтервалах. Детальний опис розподілу Вігнера-Вілля та повний набір основних властивостей даного розподілу

наведено в [2-4, 7, 12-14]. Приклад розподілу Вігнера декількох простих сигналів зображено на рис. 3.

З-поміж усіх властивостей розподілу Вігнера можна виділити наступні корисні властивості і переваги стосовно використання його в області віброакустичної діагностики ВНА [2-4,7,12-16]:

- розподіл Вігнера стосовно віброакустичного сигналу може розглядатися не лише як розподіл сигнальної енергії в частотній області, подібно до спектру, але і в часовому інтервалі;
- розподіл Вігнера може застосовуватися для аналізу нестационарних сигналів додатково до методів аналізу стаціонарних сигналів;
- використання розподілу Вігнера є найбільш інформативним для обробки віброакустичних сигналів, модульованих за амплітудою та частотою (рис. 3). З його допомогою можна легко встановити частоту модуляції, частоту несучої і амплітуду модуляції. Крім того, можна легко встановити відмінності між амплітудно- і частотно- модульованими сигналами, що досить важко здійснити при використанні традиційних методів аналізу сигналів, заснованих на класичному аналізі спектру або кепстру;
- білий шум або випадкові завади можуть легко визначатися і відділятися від корисного сигналу при використанні розподілу Вігнера.

Можна сказати, що розподіл Вігнера відіграє функцію фільтрації або розділення діагностичних сигналів не лише в частотній області, як при спектральному аналізі, але і в часі [2].

На практиці більш широко застосовується так званий псевдо-розподіл Вігнера [3], який, власне кажучи, є розподілом Вігнера, в якому розглядається згортка вихідного сигналу за допомогою організації вікна з обмеженою в часі функцією для того, щоб визначити інтеграл (1) чисельним методом. Крім того, псевдорозподіл Вігнера є зручним для реалізації на ПЕОМ (аналогічно до алгоритму швидкого перетворення Фур'є). В загальному вигляді для реалізованого за допомогою організації вікна і дискретного вихідного сигналу $f(n)$ псевдорозподіл Вігнера визначається наступним чином [3,14]:

$$PWf(n, \pi n / M) = 2 \sum_{k=-M/2+1}^{M/2} p(k) f(n+k) f^*(n-k) \cdot e^{-j \frac{2\pi nk}{M}},$$

$$m = 0, 1, 2, \dots, M - 1, \quad (2)$$

де $p(k)$ – це вікно довжиною M , центроване по n . Функція так званого “вікна” може бути однією з відомих віконних функцій (Хеммінга, Ханнінга, Кайзера) або простим прямокутним вікном.

Практичне обчислення псевдорозподілу Вігнера може виконуватися за допомогою (2) для кожного дискретного інтервалу часу n . Тобто псевдорозподіл Вігнера може обчислюватися за допомогою стандартної процедури швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) перераховуючи його для кожного конкретного моменту часу n . В роботі [14] було наведено алгоритм, заснований на побудові псевдорозподілу Вігнера на основі обчислення ШПФ.

Особливістю псевдорозподілу Вігнера є також відсутність можливості довільної зміни роздільної здатності за частотою при збільшенні довжини вікна, яка не впливатиме на роздільну здатність за часом. Іншим важливим моментом при побудові розподілу Вігнера є бажане використання аналітичного сигналу, тобто комплексного сигналу, в якому дійсна частина дорівнює реальному записаному сигналу, а уявна частина є результатом перетворення Гільберта вихідного сигналу. Це зумовлено двома причинами. По-перше, таким чином можуть бути усунені збурення біля нуля, які виникають за рахунок інтерференції між позитивними і негативними частотами. По-друге, може використовуватися незмінна частота дискретизації сигналу згідно критерію Котельникова, оскільки частотний спектр аналітичного сигналу – це однобічний спектр тільки з додатними частотами.

Оскільки використання розподілу Вігнера дає змогу швидко проаналізувати нестационарні сигнали, то, застосовуючи його для аналізу таких процесів як розгін та зупинка роторів обертових машин, можна легко визначити критичну швидкість ротора, величину його дисбалансу та ін. Таким чином, розподіл Вігнера є більш придатним для використання при обробці

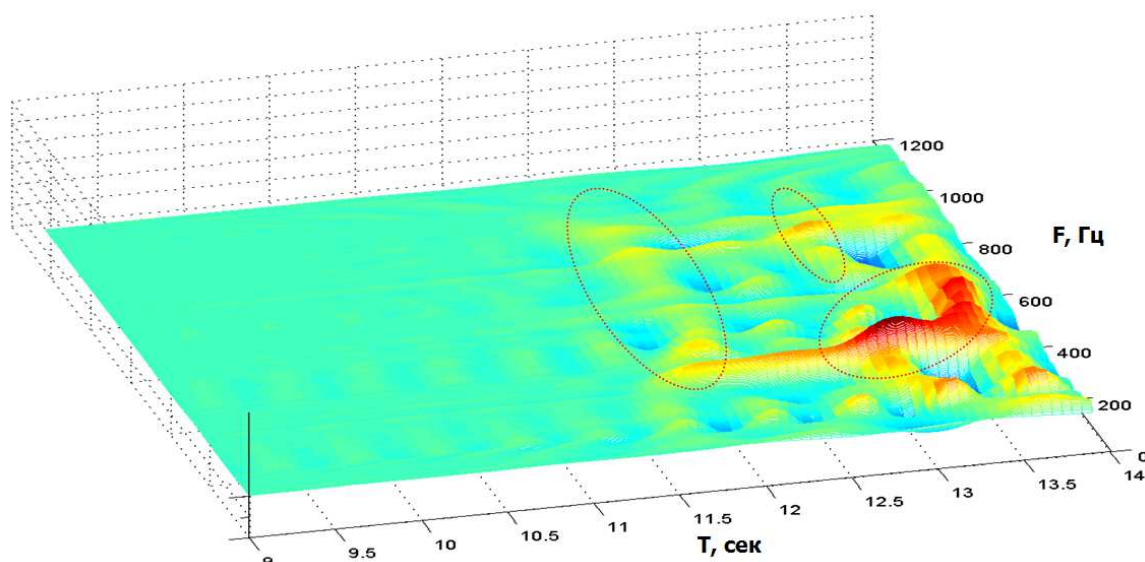
швидкоплинних вібраційних сигналів, що генеруються в процесі експлуатації ВНА і більш інформативним, ніж традиційний метод побудови та аналізу частотного спектру.

З використанням псевдорозподілу Вігнера-Вілля в середовищі Matlab було побудовано просторові картини розподілу енергії вібро-сигналу (рис. 4).

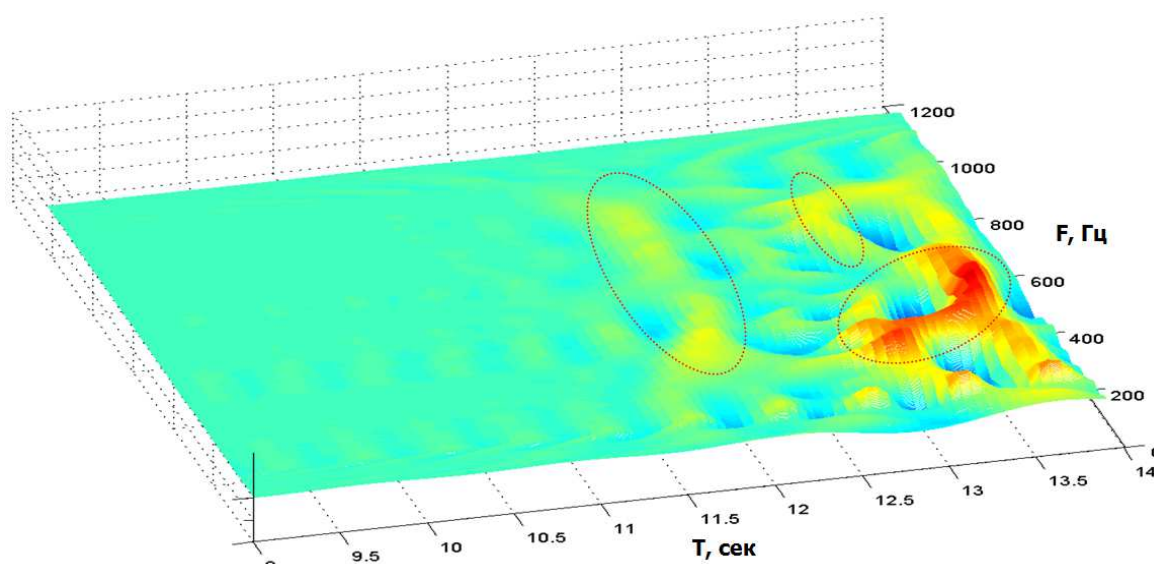
Вібро-сигнал було попередньо оброблено: нормалізовано його рівень до 0 Дб, відфільтровано всі частотні складові вище 1000 Гц та здійснено перетворення Гільберта для отримання комплексних значень сигналу. Аналізуючи отримані результати, можна стверджувати, що для бездефектного насосного агрегату (рис 4, а), в якому практично відсутні перетоки рідини, пов'язані з дефектами робочих коліс та проточної частини, під час запуску протягом перехідного процесу (приблизно в момент часу рівний 13-13.5 с) максимальна енергія вібро-сигналу зосереджується в зоні чітко вираженого максимуму, тобто в насосі відбувається гідравлічний удар внаслідок раптової зміни тиску робочих коліс насоса, які різко починають рух на рідину, що перекачується, яка є практично нестискуваною. Частково енергія цього удару призводить до незначного нагрівання рідини, що перекачується, збільшення внутрішніх напружень у деталях конструкції, а також спричинює коливання вузлів та деталей насоса – вібрацію, яка реєструється. Підтвердженням цього висновку є реалізації ЧЧР цього ж самого насоса з наявністю 25% зносу РК та направляючих апаратів, наведені на рис. 4,б. Як видно з рисунків, з розвитком дефектів РК та проточної частини присутні на рис. 4,а (виділені пунктиром) екстремуми поступово “згладжуються” чи зникають (рис. 4,б), відповідно зі зростанням величини зносу одночасно зменшується загальний рівень інтенсивності розподілу енергії сигналу протягом перехідного процесу, що вказує на наявність втрат та перетоків рідини через нещільності та збільшені зазори між деталями ВНА внаслідок їх зносу. Таким чином, тільки на діаграмі ЧЧР вібро-сигналів можна спостерігати виникнення дефектів робочих коліс та ущільнень на початкових стадіях їх розвитку.

Як видно з рис. 4, отримані результати добре корелюють із запропонованою [17] моделлю ВНА у вигляді функції передачі, пояснюючи зменшення ККД втратами та розсіюванням енергії при перетоках рідини.

Таким чином, у випадку складності чи неможливості проведення додаткових експериментів для побудови функції передачі також може бути додатково застосований аналіз вібро-сигналу процесу пуску ВНА за допомогою ЧЧР для оцінки зміни його ККД. Відповідно до існуючих можливостей проведення експерименту та технічних засобів, для оцінки технічного стану ВНА може застосовуватися як визначена функція передачі насосного агрегату, так і просторові картини розподілу потужності енергії вібро-сигналу, отримані за допомогою частотно-часового перетворення Вігнера-Вілля. Проте це є можливим лише за умови використання ста-



а) бездефектний ВНА



б) ВНА з 25% величиною зносу РК та направляючих апаратів

Рисунок 4 – Розподіл енергії вібросигналу за допомогою ЧЧР Вігнера-Вілля

ціонарної системи контролю стану ВНА на базі ПЕОМ. В обидвох випадках, користуючись запропонованими підходами, потрібно буде провести ряд експериментів, використовуючи більш досконалу апаратуру, з метою встановлення залежностей зміни технічного стану ВНА, обумовленого наявністю дефектів.

Висновки

В роботі обґрунтовано можливість застосування ЧЧР, зокрема ЧЧР Вігнера-Вілля для детального аналізу вібраційних процесів у ВНА за наявності в його частотних спектрах складних коливань. В результаті проведених досліджень побудовано та проаналізовано просторові картини розподілу енергії вібросигналу, записаного в момент пуску ЦНС-180-1900, за допомогою ЧЧР Вігнера-Вілля та доведено мо-

жливність їх використання для пошуку дефектів робочих коліс та ущільнень на початкових стадіях їх розвитку.

Література

- 1 Сулейманов Р.Н. К вопросу о связи КПД с вибрацией насосных агрегатов / Р.Н. Сулейманов // Нефтепромышленное дело. – 2004. – №5. – С. 30–36.
- 2 Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов / Блейхут Р. –М.: Мир, 1989. – 448 с.
- 3 Claassen T. A. C. M. The Wigner distribution – a tool for time-frequency signal analysis / Claassen T. A. C. M., Mecklenbrauker W. F. G. // Philips J. Res. – 1980. – V.35. – P. 217–250, 276–300, 372–389.

4 Коэн Л. Время – частотные распределения / Коэн Л. // Обзор. – ТИИЭР. –1989. – т. 77 – № 10. – С. 72–121.

5 Алексеев А. А. Технический анализ сигналов и распознавания радиоизлучений / А. А. Алексеев, А. Б. Кириллов. – С.-Пб.: ВАС, 1998. – 368 с.

6 Алексеев А. А. Анализ сигналов на основе функций распределения мощности в условиях многосигнального воздействия / А.А. Алексеев, С.Н. Чеченёв, А.Б. Кириллов // Радиотехника. – 1993. – № 10. – С. 32–37.

7 Cohen L. Proc. IEEE. / Cohen L. – 1989. – V.77. – P. 941.

8 Rihaczek A. W. Signal energy distribution in time and frequency / Rihaczek A. W. // IEEE Trans. on IT. – 1968. – Vol. 14. – No. 3. – P. 369–374.

9 Cohen L. Time-frequency Analysis / Cohen L. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1995.

10 Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення ДСТУ 2389-94 01.040.19; 19.100.

11 Choi H. Improved time – frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels / Choi H., Williams W // IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing. vol. ASSP-37. – 1987. – №10.

12 L. Cohen On a fundamental property of the Wigner distribution / L. Cohen // IEEE Transactions ASSP. –1983. – P. 559–561.

13 P. Flandrin. Time-Frequency/Time-Scale Analysis / P. Flandrin. – New York: Academic, 1999.

14 Janse C. P. Time-frequency distributions of loudspeakers: The application of Wigner distributions / C. P. Janse A. J. M. Kaizer // Journal of the Audio Engineering Society 31. – 1983. – P. 198-222.

15 Q. Meng Some new applications of Wigner distribution in machinery monitoring and diagnosis / Q. Meng and L. Qu // 6th International Symposium of IMEKO TC10, Technical Diagnostics, Prague, Czechoslovakia. – 1989. – 31 May-2 June. – P. 89.

16 Q. Meng Rotary machinery fault diagnosis using Wigner distribution / Q. Meng and L. Qu // Mechanical systems and signal processing. – 1991. – №5(3). – P. 155–166.

17 Замиховський Л.М. Контроль технічного стану відцентрових насосних агрегатів систем підтримання пластового тиску / Л.М. Замиховський, Ю.В. Паньків // Розвідка та розробка нафтових родовищ. – 2012. – № 2(43). – С.120-133.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
02.12.13*

*Рекомендована до друку
професором **Юрчишиним В.М.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Петришиним Л.Б.**
(Прикарпатський національний університет
ім. В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)*