

УДК 621.317.7.001.25

## АНАЛІЗ МОБІЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ СВЕРДЛОВИННИХ ШТАНГОВИХ НАСОСНИХ УСТАНОВОК І ШАХТНИХ ПІДНІМАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ З ПОГЛЯДУ ВІБРАЦІЙНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ

*В.В. Лопатін*

*Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2а,  
м. Дніпропетровськ, 49005, e-mail: igtmnani@yandex.ua*

*Проаналізовано застосування мобільної системи контролю устаткування свердловинних штангових насосних установок і шахтних піднімальних комплексів з погляду методу вібраційного контролю. Зроблений детальний аналіз одночасного оброблення аналогових і цифрових сигналів, що мають місце в мобільних системах контролю свердловинних штангових насосних установок і шахтних піднімальних комплексах.*

*Ключові слова: мобільна система контролю, вібраційний метод контролю, аналоговий сигнал, цифровий сигнал, фільтрація, свердловинна штангова насосна установка, шахтний піднімальний комплекс.*

*Проведен анализ использования мобильной измерительной системы контроля оборудования скважинной штанговой насосной установки и шахтного подъемного комплекса с точки зрения метода вибрационного контроля. Сделан детальный анализ одновременной обработки аналоговых и цифровых сигналов, имеющих место в мобильных системах контроля скважинных штанговых насосных установок и шахтных подъемных комплексах..*

*Ключевые слова: мобильная система контроля, вибрационный метод контроля, аналоговый сигнал, цифровой сигнал, фильтрация, скважинная штанговая насосная установка, шахтный подъемный комплекс.*

*The analysis of mobile measuring systems of control for rod pumping unit and mine elevating complexes are shown from the viewpoint of vibration method of control. Detailed analysis of the simultaneous processing of analog and digital signals that occur in mobile systems control hole beam pumping unit and shaft hoisting complexes.*

*Key words: mobile control system, vibration control method, analog signal, digital signal, filtering, borehole pumping rod unit, mine lifting complex.*

Методи розрахунку й обґрунтування технологічних параметрів мобільної системи контролю (МСК) устаткування свердловинних штангових насосних установок (СШНУ) і шахтних піднімальних комплексів (ШПК), що використовуються в практиці проектування, як правило, орієнтовані на одноваріантне проектування й не розраховані на комплексну оптимізацію МВСК як цілісної технологічної системи. Деякою мірою цей недолік ліквідується на основі системного дослідження процедур прийняття рішень при проектуванні й переході на різноманітні методи їхнього обґрунтування.

Порушення умови теореми Котельникова приводить до порушення взаємно однозначної відповідності аналогової й цифрової форм подання сигналу, і тим самим вибіркового значенням сигналу відповідає група аналогових

сигналів з різним гармонійним складом. У класичній радіотехніці подібне явище називається «ефектом накладення частот». Навіть при повнім дотриманні умов теореми Котельникова може не бути взаємно однозначної відповідності між аналоговою й цифровою формами подання сигналу МВСК і контрольованими їй вібраціями. Як показано в роботі [1], для однозначної відповідності необхідне виконання додаткової умови.

Сигнали в МВСК надходять від акселерометрів, динамічний діапазон яких у смузі до 1 кГц не перевищує 65дБ [2]. Тому для вирішення всіх завдань контролю й аналізу сигналів цілком достатнім є використання перетворювача з діапазоном 70 дБ. У сучасних процесорах з байтовою структурою запам'ятовувальних пристроїв (ЗУ) (одному байту відповідає 8 двійкових розрядів) і при

використанні АЦП із динамічним діапазоном порядку 70 дБ одному слову відповідає два байти пам'яті ЗУ. Таким чином, для аналізу вібраційного сигналу контролю із шириною спектра 1кГц при смузі фільтрації (роздільної здатності) 1 Гц обсяг пам'яті ЗУ для нагромадження одного відрізка сигналу тривалістю одна секунда із частотою дискредитації 20 кГц повинен бути рівним 4 кБайт. У МВСК при досить низькій частоті дискредитації необхідний аналіз сигналу віброконтроля може проводитися за час, менший інтервалу дискредитації. Такий вид аналізу є аналізом у реальному часі, коли на моніторі МВСК представляється результат аналізу віброконтроля за будь-який попередній відрізок часу нагромадження.

В МВСК на базі логічного контролера, що програмується (Programmable Logic Controller – PCL) [3], здійснюють цифрову обробку сигналу на схемотехнічному рівні. Для вирішення складних завдань аналізу вібрації зручно робити обробку даних з поділом у часі, коли обробка одного масиву накопичених даних виконується одночасно з нагромадженням наступного відрізка сигналу віброконтролю. ЗУ МВСК у цьому випадку можна умовно розділити на три частини, а саме: на нагромадження одного відрізка сигналу; для обробки попередньо накопиченого сигналу; для програм обробки сигналу вібрації. Так, для аналізу сигналу вібрації з діапазоном частот  $0 \div 1$ кГц у МВСК необхідний обсяг пам'яті до 30кБайт, причому програма для обробки сигналу займає обсяг порядку 20 кБайт.

Основним завданням аналізу сигналів вібрації в МВСК є цифрова фільтрація (ЦФ) на базі дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) для паралельного аналізу сигналу. Як правило, алгоритми ЦФ забезпечують фільтрацію з постійною смугою пропуску в кожному з паралельних каналів МВСК. При аналізі сигналів у МВСК прийнятим є подання ДПФ у матричній формі [2]. Таким чином, елементи матриць мають вигляд комплексно-сполучених величин, а зворотна матриця є унітарною, тоді ДПФ у МВСК можна розглядати, як перетворення координат в  $N$ -мірному просторі за допомогою оператора, що зберігає довжину вектора. Це співвідношення являє собою аналог теореми Парсеваля. При повороті системи координат змінюється лише подання вектора, що у цьому випадку може бути або тимчасовим, або частотним. На наш погляд найбільш зручним буде подання, що дозволяє зменшити число ненульових компонентів вектора. Так, відрізок гармонійного сигналу в тимчасовому

просторі має велике число відмінних від нуля координат, а в просторі частот від нуля відрізняється тільки одна координата. У ряді завдань контролю перехід від ортогонального базису тригонометричних функцій до спеціальних функцій дозволяє істотно спростити аналіз і підвищити його точність [4].

Повну аналогію між ДПФ і фільтрацією сигналу в МВСК проводити не можна, тому що складові вібраційного сигналу контролю на виході фільтра не змінюють форми, а ДПФ сигналу перетворить їх з тимчасової форми в частотну. У той же час ряд параметрів ДПФ аналогічний параметрам смугових фільтрів. Так, аналогом смуги пропуску фільтра в МВСК є роздільна здатність ДПФ по частоті, час загасання перехідних процесів у фільтрі збігається із тривалістю відрізка сигналу, що запам'ятовує, контролю вібрації. Крутості спаду амплітудно-частотної характеристики фільтра відповідає параметр розширення спектральних складових ДПФ сигналу. Таку форму спектр відрізка сигналу контролю вібрації має тому, що його представлено добутком гармонійного сигналу на функцію, названу «прямокутним тимчасовим вікном». Спектр добутку двох функцій, як відомо, дорівнює згортці спектрів функцій, а спектр функції «вікна» має кінцеву ширину. Для зниження спектральної щільності сигналу вібраційного контролю в МВСК використовуються тимчасові «вікна» складної форми, наприклад «вікна» Хеммінга, Ханна й ін. [5, 6]. На нашу думку кращі результати досягаються при використанні «вікна» виду  $(\sin x)/x$ , однак, внаслідок великого обсягу обчислень, цей вид «вікна» складно застосовувати при практичному аналізі сигналів вібрації в МВСК.

Розмив спектра кінцевої тривалості приводить ще до однієї помилки МВСК. Вона пов'язана з дискретністю спектра вібраційного сигналу на виході процесора МВСК. Якщо частоти гармонійного складового аналізованого вібраційного сигналу збігаються з однією із частот розгортки МВСК, то спектр цієї складової відмінний від нуля тільки на цій частоті. Якщо частота не збігається, то амплітуда складової «розмивається» по декількох частотах. Цей ефект аналогічний помилці вимірювання амплітуди сигналу на виході аналогового фільтра, якщо центральна частота фільтра не збігається із частотою сигналу. Похибка зменшується, якщо використовуються фільтри із прямокутною амплітудно-частотною характеристикою. При аналізі в МВСК нами це питання вирішується вибором функції «вікна» [6].

При визначенні параметрів детермінованих сигналів вібраційного контролю на фоні випадкових складових за значеннями, отриманими з однієї вибірки фіксованої тривалості, часто не забезпечується задана точність вирішення поставлених завдань контролю. Необхідно або збільшувати тривалість вибірки, відповідно збільшуючи вирішальну здатність аналізатора МВСК, або накопичувати результати аналізу і їх усереднювати, як у роботі [5].

Фазовий аналіз детермінованих сигналів вібраційного контролю МВСК із використанням ДПФ має ряд особливостей. Одна з них визначається тим, що величина фази гармонійних складових залежить від часу початку дискретизації відрізка сигналу вібраційного контролю. Тоді фізичний зміст дістає різниця початкових фаз між кратними за частотою складового сигналу вібрації. Інша особливість фазового аналізу полягає в тому, що при розбіжності частоти гармонійною складовою з результатом її вимірювання буде отримана систематична похибка. Ця систематична похибка аналогічна похибці визначення фази гармонійної складової сигналу, пропущеного через фільтр з вузькою смугою із нерівномірної фазочастотною характеристикою.

У МВСК для накопичення результатів вимірювання фазових характеристик можна використати синхронні методи цифрової обробки сигналу контролю, коли частота дискретизації пропорційна частотам гармонійних складових сигналу контрольованої вібрації. Такі методи аналізу сигналів можуть бути використані в тому випадку, якщо в МВСК вводиться додаткову інформацію про період контрольованого вібраційного сигналу. Синхронні методи цифрової обробки можуть будуватися на використанні синхронного сигналу запуску, що виключає систематичні похибки при фазових вимірюваннях і підвищує ефективність аналізу сигналів при нестабільній частоті вібрації. У МВСК передбачене скорочення часу обчислень шляхом застосування швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

Зрозуміло, що для опису випадкового сигналу вібрації контрольованої МВСК необхідне обчислення кореляційної функції або спектральної щільності сигналу. Обчислення кореляційної функції в МВСК вимагає значного числа операцій (порядку  $N^2$  операцій множення дискретних значень сигналу за відрізок сигналу), тому, коли вимоги контролю невисокі або мало часу для опису випадкового сигналу, використовується спектральна щільність

вібраційного сигналу. При необхідності кореляційна функція випадкового вібраційного сигналу може бути отримана за допомогою зворотного перетворення Фур'є від спектральної щільності сигналу.

Аналіз суміші детермінованих і випадкових сигналів за допомогою цифрового аналізатора лише незначно відрізняється від аналізу за допомогою аналогової апаратури. За даними, наведеним у роботі [7] максимальна різниця результатів є меншою 3дБ. На наш погляд, зазначена розбіжність результатів аналізу складних сигналів є причиною того, що енергетична сума результатів аналізу вузького сигналу може відрізнитися від результату аналізу широкої смуги вібраційного сигналу, якщо один з аналізаторів виконано цифровим, а інший - аналоговим. Слід зазначити, що через труднощі аналізу суміші детермінованих і випадкових сигналів програми перерахування результатів аналізу МВСК із однієї смуги в іншу виявляються громіздкими, тому набагато простіше виконати повторний аналіз вібраційного сигналу з іншою шириною смуги пропуску цифрового фільтра МВСК, ніж перерахувати результат аналізу. У ряді завдань для аналізу сигналів вібрації виникає необхідність підвищувати величину дозволу в МВСК по частоті до значення 10-2 Гц. МВСК дозволяє вирішити це завдання з попереднім виділенням вузької смуги ділянки спектра вібрації.

Оскільки вирішення основних завдань віброконтролю МВСК засновано на одержанні максимального обсягу інформації, що втримується в сигналах складної структури, а для таких сигналів практично не існує аналогових приладів і систем контролю, якість вирішення віброконтролю визначається якістю програмного забезпечення МВСК.

При аналізі сигналу вібраційного контролю МВСК у попередньо виділеній смузі частот не повинні втримуватися складові, що не входять до складу сигналу. У тому випадку, якщо у спектрі сигналу присутні відомі адитивні складові, необхідно їх попередньо відфільтрувати, що реалізується в МВСК, наприклад, шляхом зведення до нуля відповідних елементів осцилограми.

Аналіз складних сигналів у МВСК, що представляють собою суму сигналів від просторово рознесених джерел вимушених сил вимагає побудови кореляційних і взаємно кореляційних функцій, або взаємних спектрів сигналів вібрації, вимірюваних у різних точках механізмів й устаткування.

Як правило, при наявності в сигналі вібрації

випадкових складових величина спектральної щільності визначається при усередненні за декількома осцилограмами. З метою зменшення обсягів обчислення кореляційні й взаємно кореляційні функції сигналів вібрації будуються на базі зворотного ДПФ спектральної й взаємної спектральної щільності сигналів, обумовленої осцилограмами відрізків сигналу.

У спеціальних завданнях аналізу сигналів вібрації при відсутності одержуваного непрямим шляхом опорного сигналу, синхронного з досліджуваними гармонійними складового сигналу вібрації, і необхідності одержання інформації про початкові фази складових застосовується тривимірний кореляційна функція або її аналог у частотній області – біспектр сигналу вібрації. При використанні цифрових методів аналізу в МВСК для скорочення обсягу обчислень біспектри сигналу доцільно будувати за осцилограмами відрізків сигналу вібрації, а потім, після усереднення отриманих результатів, розрахувати при необхідності тривимірну кореляційну функцію сигналу.

У ряді вібраційних завдань МВСК дефект може виявлятися за появою ударних імпульсів, які викликають вібрацію, що має велику кількість кратних гармонік. Для інтегрального методу контролю такого роду дефектів у МВСК використовуються методи, засновані на аналізі кеспектра сигналу вібрації, що, крім поділу сигналів, що входять у згортку, служить і для визначення періодичності спектру в шкалі частот. Для одержання кеспектра сигналу в осцилограмі відрізка сигналу кожна складова логарифмується, а потім частотна вісь осцилограми міняється на тимчасову й будується нова осцилограма утвореного відрізка сигналу. У процесі обчислення кеспектра використовується нелінійна операція логарифмування, тому необхідно згладити осцилограму за допомогою цифрового фільтра низьких частот для усунення перекручування результатів аналізу через «ефект накладення частот».

Як видно, спільне застосування складних алгоритмів аналізу сигналу вібрації й методів обробки результатів аналізу в МВСК дозволяє не тільки вирішувати необхідні завдання контролю, але й деякі елементи прогнозування технічного стану контрольованого об'єкта.

## ВИСНОВКИ

Вирішення основних завдань вібраційного методу контролю МВСК засновано на одержанні максимального обсягу інформації, що втримується в сигналах складної структури, а для таких сигналів практично не існує аналогових аналізуючих приладів і систем контролю, якість рішення вібраційного контролю визначається якістю програмного забезпечення МВСК.

Спільне застосування складних алгоритмів аналізу сигналу вібрації й методів обробки результатів аналізу в МВСК дозволяє вирішувати не тільки необхідні завдання контролю, але й деякі елементи прогнозування технічного стану контрольованого об'єкта.

1. Кловский Д.Д. *Теорія передачі сигналів* / Д.Д. Кловский. - М.: Зв'язок, 1978 – 324 с.
2. Копей Б.В. *Мобільні вимірювальні системи в нафтогазовій та гірничій промисловості. Монографія* / Б.В. Копей, В.В. Лопатін, О.І. Стефанішин. - Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. – 392 с.
3. Kopey B. *Modern mobile informative-measuring systems in petroleum and mine industries* / B. Kopey, V. Lopatin // ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ - Ostrava – 2009/ - *Seria: GÓRNICTWO*/ - з. 287. - P.105-113.
4. Патент 3554012 США *Метод й апаратури для визначення механічного стану машин* / Е.О. Сехоль. - заявл. Швецією 29.02.68, № 709451 ; опубл. 12.01.71, офіційний бюлетень (США), т. 882, № 2.
5. Рабінер Л. *Теорія й застосування цифрової обробки сигналів* /Л. Рабінер, Б. Гоулд. - М.: Світ, 1978.
6. Лопатін В.В. *Раціональна цифрова фільтрація в мобільній вимірювальній системі контролю* /В.В. Лопатін // *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. Науково-виробничий збірник. – Вип. № 2/2010 (6) - Кременчук. – 2010 - С. 110-116.*
7. *Development of automatic vibration transducer.* ZOSEN. - December, 1997 - P. 46-53.

Поступила в редакцію 19.05.2011 р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук,  
проф. Заміховський Л. М.