

Визначення параметрів рухомого вікна для опрацювання сигналу віброакселерометра

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.118>

Роман Федоришин
Національний університет «Львівська політехніка»,
Львів, Україна
roman.m.fedoryshyn@lpnu.ua

Василь Лимич
Національний університет «Львівська політехніка»,
Львів, Україна
vasyl.v.lymych@lpnu.ua

Анотація — запропоновано метод опрацювання сигналу віброакселерометра для оцінки завантаженості кульового барабанного млина. На основі експериментальних спектрів синтезовано часові сигнали за допомогою оберненого перетворення Фур'є та визначено оптимальні параметри рухомого вікна для побудови спектрів методом швидкого перетворення Фур'є. Запропоновано критерій оптимальності, що поєднує точність відтворення спектральних характеристик та ефективність використання ресурсів мікропроцесорної системи.

Ключові слова — кульовий барабанний млин; віброакселерометр; завантаженість млина; частотні спектри; рухоме вікно; перетворення Фур'є.

I. ВСТУП

Аналіз сигналів віброакселерометра дає достовірну інформацію про стан механічних систем і часто використовується в промисловості для контролю завантаження кульових барабанних млинів [1]. Дослідження вібрацій дозволяє оцінити рівень заповнення, що сприяє оптимізації роботи, зниженню енергоспоживання та зносу обладнання. Перехід від часового сигналу до частотного спектру підвищує ефективність аналізу, оскільки амплітудні відхилення стають більш очевидними. Для цього застосовують швидке перетворення Фур'є (ШПФ) [2].

На рисунках 1 і 2 наведено частотні спектри сигналів для порожнього та повного млина, і їх залежність від рівня завантаженості [3]. З аналізу видно, що зі збільшенням заповнення амплітуда сигналу зменшується. Корисний спектральний діапазон становить 2 – 6 кГц.

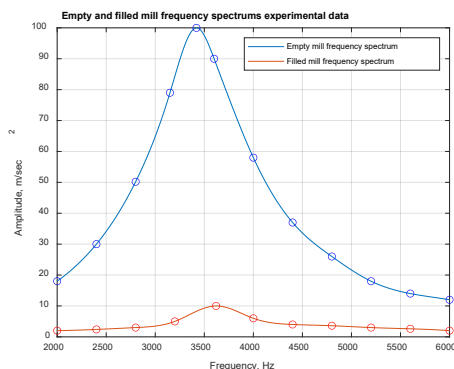


Рис. 1. Частотні спектри сигналу віброприскорення для порожнього (синя крива) та повного (червона крива) млина

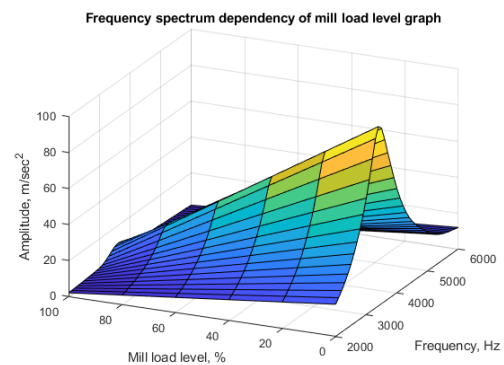


Рис. 2. Залежність частотного спектру від завантаженості млина

II. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

На основі експериментально отриманих точок частотного спектру відтворимо часовий сигнал віброприскорення, після чого з цього синтезованого сигналу побудуємо частотний спектр для порівняння з початковими даними. Ці операції виконаємо в середовищі Matlab із використанням функції *ifft*, яка реалізує зворотне перетворення Фур'є.

Для коректного синтезу часового сигналу необхідно визначити частоту дискретизації та кількість точок сигналу. Відповідно до теореми Найквіста, частота дискретизації цифрового сигналу повинна бути щонайменше удвічі більшою за максимальну частоту аналогового сигналу на вході системи [4], [5]. З рисунку 1 видно, що найвища частота сигналу віброприскорення становить 6 кГц, що відповідає частоті Найквіста 12 кГц. Відповідно до рекомендацій виробників вимірювального обладнання [4], [5], для забезпечення високої точності дискретизації доцільно подвоїти цю частоту. Отже, для синтезу часових сигналів вибрано такі параметри:

- частота дискретизації: 24 кГц;
- кількість точок сигналу: 12000;
- тривалість сигналу: 0,5 с.

Синтезовані часові сигнали та спектри для порожнього й повного млина (рисунки 3 та 4), побудовані за допомогою *fft*, добре узгоджуються з експериментальними даними, що підтверджує коректність застосування прямого та зворотного перетворення Фур'є.

Empty mill calculated time domain values and frequency spectrums comparison

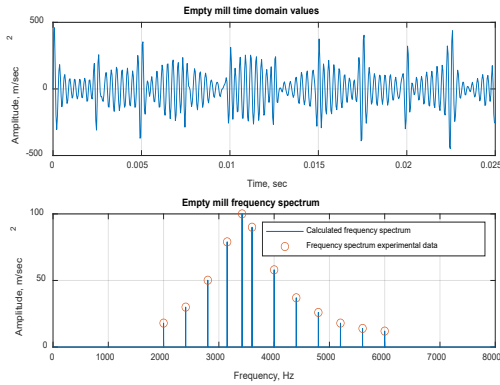


Рис.3. Часовий сигнал віброприскорення і порівняння розрахованого частотного спектру з експериментальними даними для порожнього млина

Filled mill calculated time domain values and frequency spectrums comparison

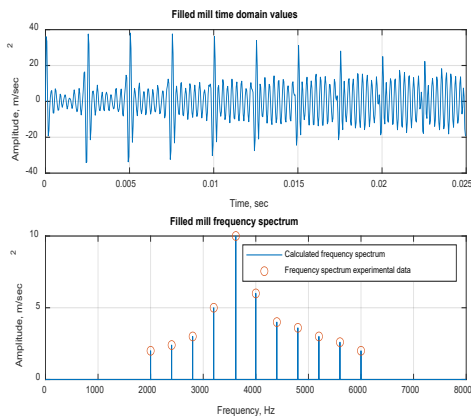


Рис.4. Часовий сигнал віброприскорення і порівняння розрахованого частотного спектру з експериментальними даними для повного млина

Введемо умовне позначення T_{win} , яке характеризує оптимальний розмір рухомого вікна у секундах. Аналіз рисунків 3 та 4 показує, що період одного циклу сигналу віброприскорення дорівнює 2,5 мс. Теоретично це відповідає мінімально допустимому розміру рухомого вікна для побудови частотного спектру. Для дослідження впливу розміру вікна на спектральні характеристики проведемо побудову частотних спектрів порожнього та повного млина для різних значень T_{win} (рисунки 5 та 6).

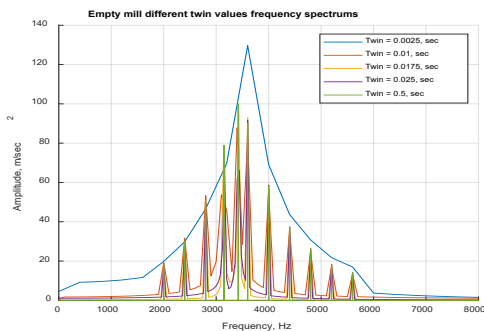


Рис. 5. Частотні спектри при різних значеннях T_{win} для порожнього млина

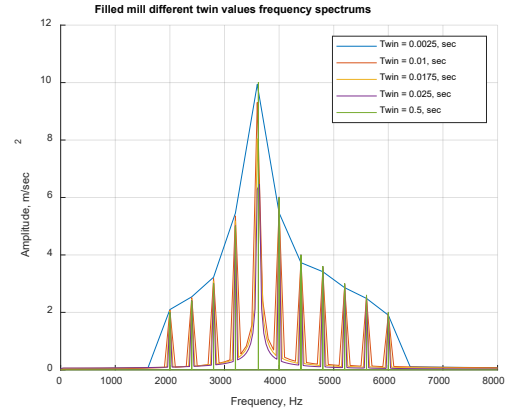


Рис. 6. Частотні спектри при різних значеннях T_{win} для заповненого млина

Аналіз рисунків 5 та 6 дозволяє зробити такі висновки:

- зі збільшенням значення T_{win} якість побудованого частотного спектру покращується;
- при $T_{win} = 2,5$ мс (що відповідає періоду одного циклу сигналу віброприскорення) якість спектру є незадовільною;
- при $T_{win} = 25$ мс спектр набуває форми, близької до спектру, побудованого для повної тривалості сигналу ($T_{win} = 500$ мс). Тому це значення можна вважати нижньою межею розміру рухомого вікна для подальшого пошуку оптимальних параметрів.

Для пошуку оптимального розміру рухомого вікна введемо умовні позначення:

- n_{win} – кількість точок у рухомому вікні;
- n_{win}' – нормоване значення кількості точок у рухомому вікні;
- s – площа під частотним спектром, м/с^3 ;
- s' – нормоване значення площі під частотним спектром.

Нормовані значення n_{win}' та s' визначаються за відповідними формулами:

$$n_{win}' = n_{win} / \max(n_{win}), \quad (1)$$

$$s' = s / \max(s). \quad (2)$$

Для визначення верхньої межі рухомого вікна розглянемо графіки зміни завантаженості млина при зміні подачі вугілля, швидкості зміни завантаженості, а також оберненого значення цієї швидкості (рисунки 7 – 9).

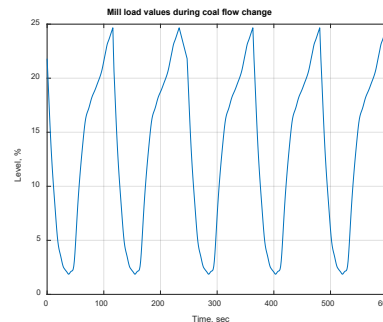


Рис. 7. Зміна завантаженості млина при зміні подачі вугілля [6]

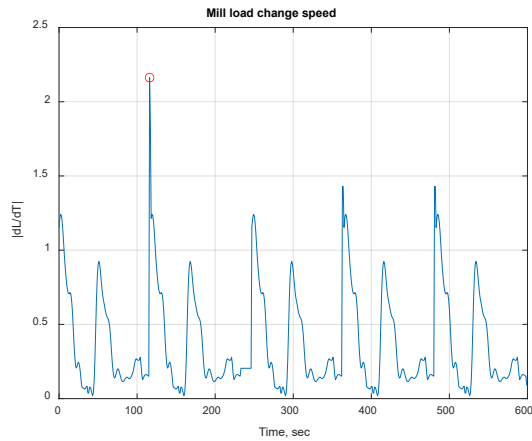


Рис. 8. Швидкість зміни завантаженості млина (о – точка максимальної швидкості)

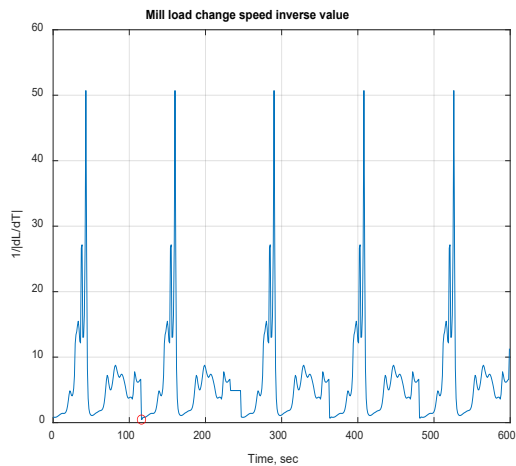


Рис. 9. Обернені значення швидкості зміни завантаженості млина (о – мінімальний період часу, за який завантаженість млина може змінитися на 1%)

З рисунку 8 видно, що максимальна швидкість зміни завантаженості млина дорівнює 2,16 %. Відповідно до цього значення, мінімальний час, за який завантаженість млина може змінитися на 1% при максимальній швидкості, наведено на рисунку 9. Цей інтервал часу приймаємо за верхню межу розміру рухомого вікна для побудови частотних спектрів. У розглянутому випадку він становить 462 мс.

Використовуючи визначені нижню та верхню межі тривалості рухомого вікна, побудуємо залежності $n_{win}'(T_{win})$, $s(T_{win})$ та $s'(T_{win})$ (рисунки 10 та 11). Крок збільшення розміру рухомого вікна прийнято рівним мінімальній тривалості, тобто 25 мс.

Аналіз рисунків 10, 11 показує, що зі збільшенням T_{win} значення s зменшується, а n_{win} зростає.

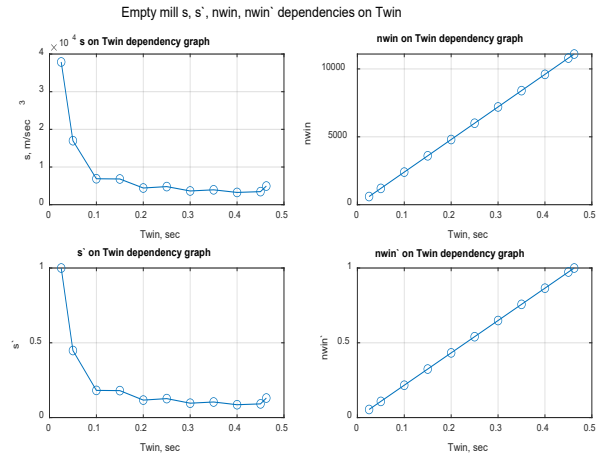


Рис. 10. Залежності: $n_{win}'(T_{win})$, $n_{win}(T_{win})$, $s(T_{win})$, $s'(T_{win})$ для порожнього млина

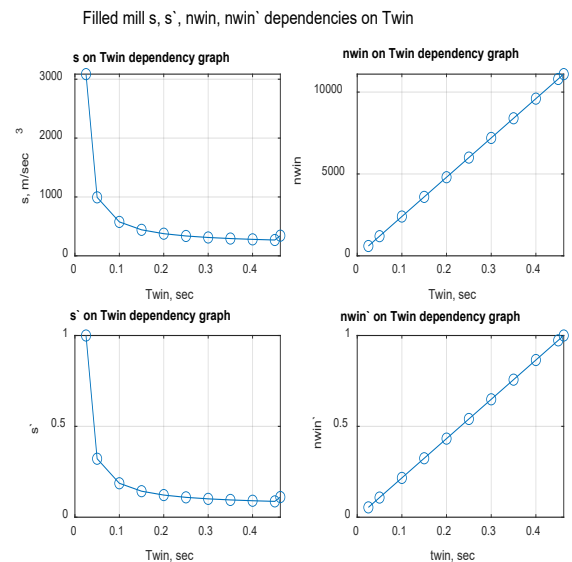


Рис. 11. Залежності: $n_{win}'(T_{win})$, $n_{win}(T_{win})$, $s(T_{win})$, $s'(T_{win})$ для заповненого млина

Для визначення оптимальних значень T_{win} використаємо наступний критерій оптимальності:

$$I = s' + n_{win}'. \quad (3)$$

Значення критерію оптимальності для порожнього та заповненого млина зображені на рисунках 12 та 13 відповідно, з яких видно, що мінімальне значення критерію оптимальності для порожнього та заповненого млина спостерігається при $T_{win} = 100$ мс. Тому це значення приймаємо за оптимальний розмір рухомого вікна для побудови частотного спектру.

Відповідні частотні спектри порожнього та заповненого млина при $T_{win} = 100$ мс наведено на рисунках 14 та 15.

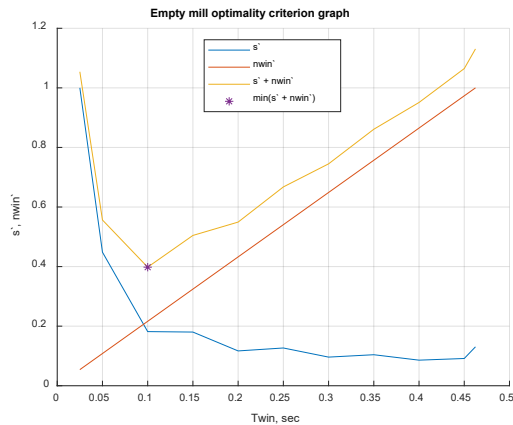


Рис. 12. Значення критерію оптимальності для порожнього млина

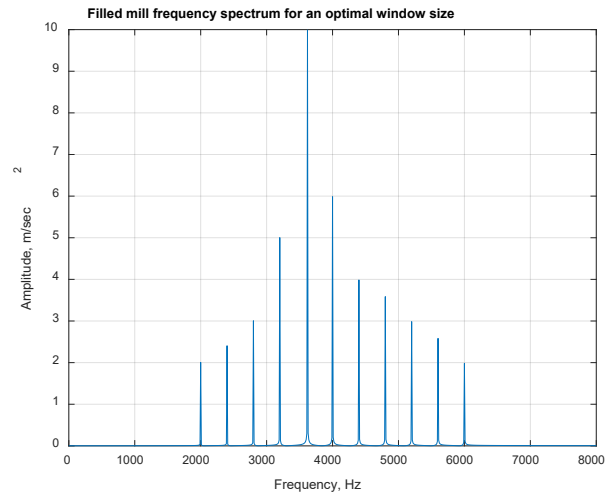


Рис. 15. Частотний спектр заповненого млина для оптимального розміру рухомого вікна

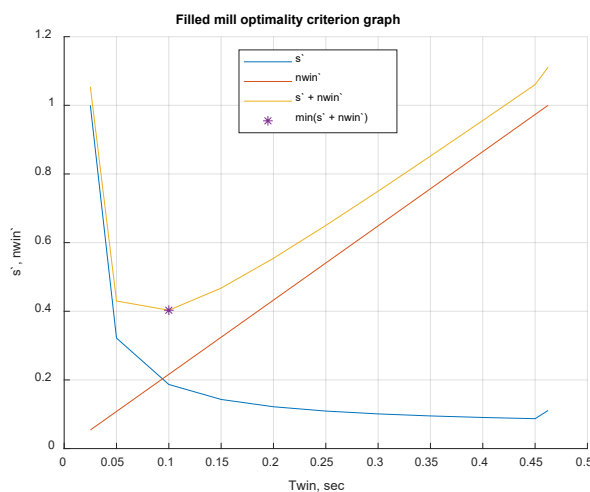


Рис. 13. Значення критерію оптимальності для заповненого млина

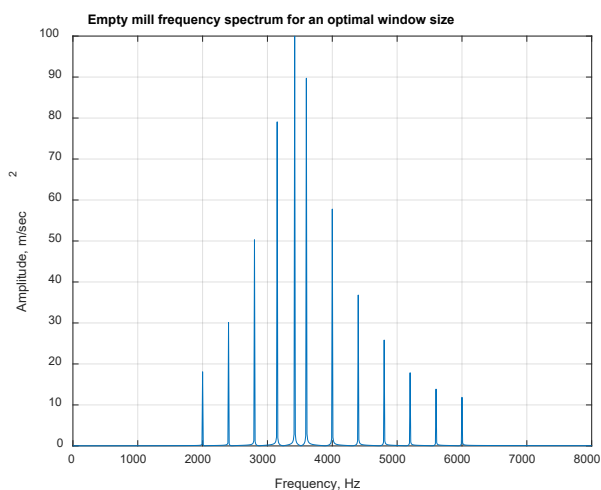


Рис. 14. Частотний спектр порожнього млина для оптимального розміру рухомого вікна

Крок переміщення рухомого вікна доцільно встановити на рівні 50 мс. У цьому випадку вікно буде зміщуватися по часовому сигналу з 50% перекриттям. Протягом 50 мс завантаженість млина може змінитися не більш ніж на 0,1 %, що є повністю прийнятним значенням.

ВИСНОВОК

У результаті виконаних досліджень встановлено, що розмір рухомого вікна при опрацюванні сигналу віброакселерометра впливає на якість побудови частотного спектру. Якщо розмір рухомого вікна є занадто малим, то отриманий частотний спектр не буде відповідати реальному і якість побудови спектру буде незадовільною. Занадто велике рухоме вікно потребує більше часу на опрацювання сигналу та більше пам'яті для зберігання відліків рухомого вікна, що веде за собою необхідність збільшення обчислювальних ресурсів мікропроцесорної системи. В даній роботі на основі аналізу частотних спектрів сигналу віброприскорення для заповненого та порожнього млина розроблено методику визначення оптимального розміру рухомого вікна, яка базується на інтегральному критерії оптимальності, що враховує якість побудови частотного спектру та вплив розміру рухомого вікна на ресурси та продуктивність мікропроцесорної системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Huang, P., Jia, M. & Zhong, B. (2014). Study on the method for collecting vibration signals from mill shell based on measuring the fill level of ball mill. Mathematical Problems in Engineering, vol. 2014. Article ID 472315, 10 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/472315>.
- [2] Brigham E. Oran. The Fast Fourier Transform and Its Applications. New York: Prentice-Hall, 1988.
- [3] Pistun, Y[evhen]; Fedoryshyn, R[oman]; Zagraj, V[olodymyr]; Nykolyn, H[ryhoriy] & Kokoshko, R[oman] (2019). Experimental Study and Mathematical Modelling of Nonlinear Control Plant, Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, pp.0967-0975, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.
- [4] R.B. Randall. Frequency Analysis. Bruel & Kjaer, 1987.
- [5] Грень Я. Програмування систем реального часу: навч. посібник/ Я. Грень. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 324 с.
- [6] Пістун С. П., Федоришин Р. М., Николин Г. А., Заграй В. С. Побудова математичної моделі кульового барабанного млина із застосуванням отриманих експериментальних даних // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: український міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2019. – Вип. 53. – С. 44–55.