

ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНО-ЧАСОВОГО КВАДРАТИЧНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МАШИН ЗВОРОТНО-ПОСТУПАЛЬНОЇ ДІЇ

141-147

Воронцов О.Г. к.т.н., доцент, Дегтяренко І.В. асистент
Донецький державний технічний університет

В цій статті наведено опис застосування методу частотно-часового аналізу для контролю технічного стану машин зворотно-поступальної дії. Наведено алгоритм синтезу квадратичного частотно-часового детектору та приклад його реалізації для посередньої оцінки тиску, що розвиває поршневий компресор, за результатами частотно-часового аналізу (ЧЧА) його вібрацій.

In this article application of time-frequency analysis method to control operating conditions of a reciprocation machine are given. Shown descriptions of synthesis quadratic time-frequency detector algorithm and its implementation to piston compressor pressure estimation by time-frequency analysis of vibration.

Механічні вібрації машини зворотно-поступальної дії (МЗПД) збуджуються в результаті динамічної взаємодії між її елементами та робочим тілом. Характер навантажень при цих взаємодіях, а отже і збуджуваних ними вібрацій визначається конструкцією машини, режимом її роботи, параметрами робочого тіла, технічним станом елементів тощо.

Параметри коливань виникаючих під дією змінюючихся навантажень залежать насамперед від властивостей елементів конструкції, що їх сприймають і, отже, несуть деяку інформацію про ці елементи. Зазначена обставина є основою посередніх методів оцінки технічного стану машини за показниками збуджуваних у ній коливань, і сьогодні широко використовується в сучасних системах вібродіагностики і моніторингу [1]. Але, існуючі системи контролю оцінюють інтегральні показники вібрацій у виділених частотних областях за інтервал часу значно перевищуючий робочий цикл машини, і тому їхні можливості по виявленню дефектів, що зароджуються в окремих сполученнях і вузлах, дуже обмежені. Зміни, внесені в інтегральні показники вібрацій машини є складовою

частиною, що обумовлена зміною властивостей аналізованого вузла, можуть виявитися занадто малими, на фоні результуючої вібрації яка обумовлена коливаннями, що збуджуються, в інших вузлах.

Більш тонкий аналіз вібрацій з урахуванням не тільки розподілу їхньої енергії в частотній області, але і зміни їх у часі, дозволяє встановити більш тісний зв'язок між показниками вібрацій, що оцінюються у такий спосіб, і тими навантаженнями, що їх викликають. Це дозволяє істотно поліпшити можливості диференціальної діагностики машин і підвищити чутливість методу вібродіагностики.

Віброакустичний сигнал (ВАС), що випромінюється агрегатом, можна уявити у вигляді такої моделі:

$$H_0^k : r_0(t) = s_0^k(t) + n^k(t), \quad (1)$$

$$H_1^k : r_1(t) = s_1^k(t) + n^k(t),$$

де H_0^k - гіпотеза про відсутність дефекту в k -тому вузлі (дефект не перевищив гранично припустимий рівень);

H_1^k - гіпотеза про наявність дефекту в k -тому вузлі (дефект перевищив гранично припустимий рівень);

$s_i^k(t)$ - складова, що містить інформацію про наявність ($i=1$), або про відсутність ($i=0$) дефекту в k -тому вузлі;

$n^k(t)$ - шумова складова, що не залежить від технічного стану k -того вузла;

k - номер вузла, що діагностується ($k=1:N_{\text{вузлів}}$);

$N_{\text{вузлів}}$ - кількість вузлів агрегату, що діагностуються.

Таким чином, задача контролю технічного стану механізму зводиться до виділення взаємовиключних один від одного $s_0^k(t)$ сигналів $s_1^k(t)$ на фоні стаціонарного шуму $n^k(t)$. Якщо за модель $n^k(t)$ прийняти Гаусів білий шум, то ця задача зводиться до класичної в теорії статистичних рішень [2] та вирішується шляхом обчислення критерію відношення правдоподібності

$$H_0 : \Lambda(r) < \eta, \quad (2)$$

$$H_1 : \Lambda(r) \geq \eta,$$

де $\Lambda(r)$ - відношення правдоподібності;

η - поріг прийняття рішення.

Для знайдення відношення правдоподібності можуть бути використані квадратичні статистики [3]

$$\Lambda(r) = \langle H_r, r \rangle = \int_0^t \int_0^{t'} h(t, t') r(t') r^*(t) dt dt', \quad (3)$$

де $h(t, t')$ - імпульсна характеристика детектора;
 (*) - позначає комплексно-сполучену величину;
 t - інтервал спостереження, $0 \leq t' \leq t$.

Зокрема, квадратичні статистики можуть бути знайдені через надання сигналів у частотно-часовій області [3]:

$$\Lambda^k(r) = \langle H^k_r, r \rangle = \langle \rho^k, P_r \rangle = \iint_{D_k} \rho^k(t, f) P_r^k(t, f) dt df, \quad (4)$$

$$\text{де } \rho^k(t, f) = \int_0^{\tau} h^k\left(t + \frac{\tau}{2}, t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (5)$$

- символ Вейла;

$P_r^k(t, f)$ - частотно-часовий розподіл (ЧЧР);

D_k - частотно-часова область, яка містить інформацію про технічний стан k -того вузла.

Таким чином, квадратична статистика сигналу може розглядатися як зважений інтеграл від $P_r(t, f)$.

Вікно, що зважує, для частотно-часового детектора може бути визначене як

$$\rho^k(t, f) = \bar{P}_1^k(t, f) - \bar{P}_0^k(t, f), \quad (6)$$

де $\bar{P}_i^k(t, f) = \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} P_i^{k(n)}(t, f)$ - еталонне ЧЧР, отримане за результатами усереднення N_i спостережень;

$P_i^{k(n)}(t, f)$ - ЧЧР для n -ої реалізації ВАС, отриманої за тих самих незмінних умов ($i = 0$ або $i = 1$, для k -го вузла).

У цьому випадку квадратична статистика буде мати вигляд

$$\Lambda^k(r) = \iint_{D_k} (\bar{P}_1^k(t, f) - \bar{P}_0^k(t, f)) P_r(t, f) dt df. \quad (7)$$

Ця квадратична статистика є локально-оптимальною при низькому співвідношенні сигнал-завада [3].

На сьогоднішній день існує велика кількість методів одержання ЧЧР [4]. Найбільш вдалим, з погляду керування рівнем та мінімізації

єю інтерференційних компонент, є розподіл Цзуя-Уільямса. Тому цей розподіл найбільш придатний для аналізу багатоконпонентних сигналів. Формула для одержання розподілу Цзуя-Уільямса має вигляд [4]

$$P_{cw}(t, f) = \frac{1}{4\pi^{3/2}} \iint_D \sqrt{\frac{\sigma}{\tau^2}} e^{\frac{-\sigma(u-t)^2}{4\tau^2 - j\tau\omega}} r_a^* \left(u - \frac{1}{2}\tau \right) r_a \left(u + \frac{1}{2}\tau \right) du d\tau. \quad (8)$$

де $r_a(t) = r(t) + j \cdot \tilde{r}(t)$ - аналітичний сигнал дійсного сигналу $r(t)$, що аналізується;

$$\tilde{r}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{r(\tau)}{t - \tau} d\tau - \text{перетворення Гільберта [5] сигналу } r(t).$$

D - область визначення τ і u ;

σ - деяка константа, змінюючи значення якої, можна управляти рівнем інтерференційних компонент.

Алгоритм синтезу частотно-часового детектора для контролю технічного стану МЗПД можна описати в такому вигляді:

1. Створюється бібліотека частотно-часових уявлень ВАС для випадків нормальної роботи і відмови кожного контролюваного вузла машини.

2. Виділяються інформаційні області для кожного вузла в частотно-часовому уявленні сигналів, які б забезпечували необхідне співвідношення сигнал - завада (під сигналом тут розуміються частотно-часові компоненти, які залежать від технічного стану контролюваного вузла, а під завадою - усі інші компоненти).

3. Тестування детектора здійснюється шляхом наведення на його вхід даних, що відповідають нульовому і одиничному стану вузла, що контролюється. Визначаються параметри законів розподілу результатів детектирування, і на цих даних будуються його робочі характеристики.

4. Задаючись припустимим значенням співвідношення між можливістю помилкової тривоги (P_F) та можливістю правильного виявлення (P_D) по робочій характеристиці, визначається поріг прийняття рішення.

Алгоритм, що було описано вище, та модель детектора були дослідженні на прикладі посередньої оцінки тиску, що розвиває малий поршневий холодильний компресор ХКВ-6.23, за результатами ЧЧА

вібрацій на випускному патрубку. За гіпотезу H_0 було прийнято стан, коли на випускному патрубку компресора тиск складав 8 аті., а за гіпотезу H_1 - стан, коли тиск складав 10 аті.

Дані про віброактивність компресора реєструвались за допомогою акселерометра, встановленого на кожусі компресора біля випускного патрубка. Сигнали віброприскорення були цифровані з частотою дискретизації 44100 Гц. Алгоритм синтезу частотно-часового детектора був реалізований на пакеті Matlab 5.2. Для виділення окремих циклів роботи компресора був використаний сигнал стробуємий відкриттям випускного клапана компресора. Аналізовані часові фрагменти бралися в окрузі строб-імпульсу і мали довжину 1024 відліків (23,2 мс).

Еталонні частотно-часові уявлення $\bar{P}_i(t, f)$ сигналів, отримані для обох станів агрегату ($N_{1,2}=10$) подані на рисунках 1 та 2.

Дослідження детектора було проведено у трьох різноманітних інформаційних областях:

$$D^{(1)} - t = 0:23,2 \text{ мс}, f = 0:22050 \text{ Гц};$$

$$D^{(2)} - t = 12:22 \text{ мс}, f = 12000:22000 \text{ Гц};$$

$$D^{(3)} - t = 2:8 \text{ мс}, f = 100:10000 \text{ Гц};$$

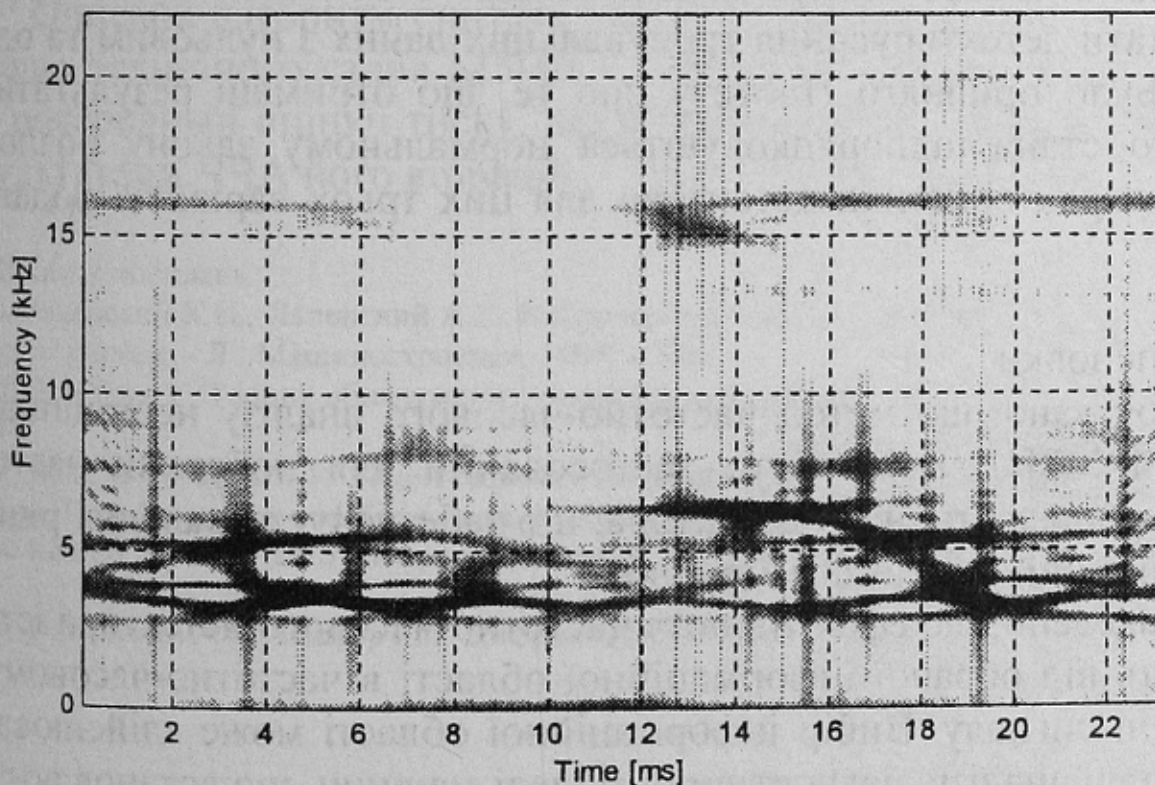


Рисунок 1 - Усереднений ЧЧР Цзуя-Уільямса для стану H_0 (тиск 8 аті)

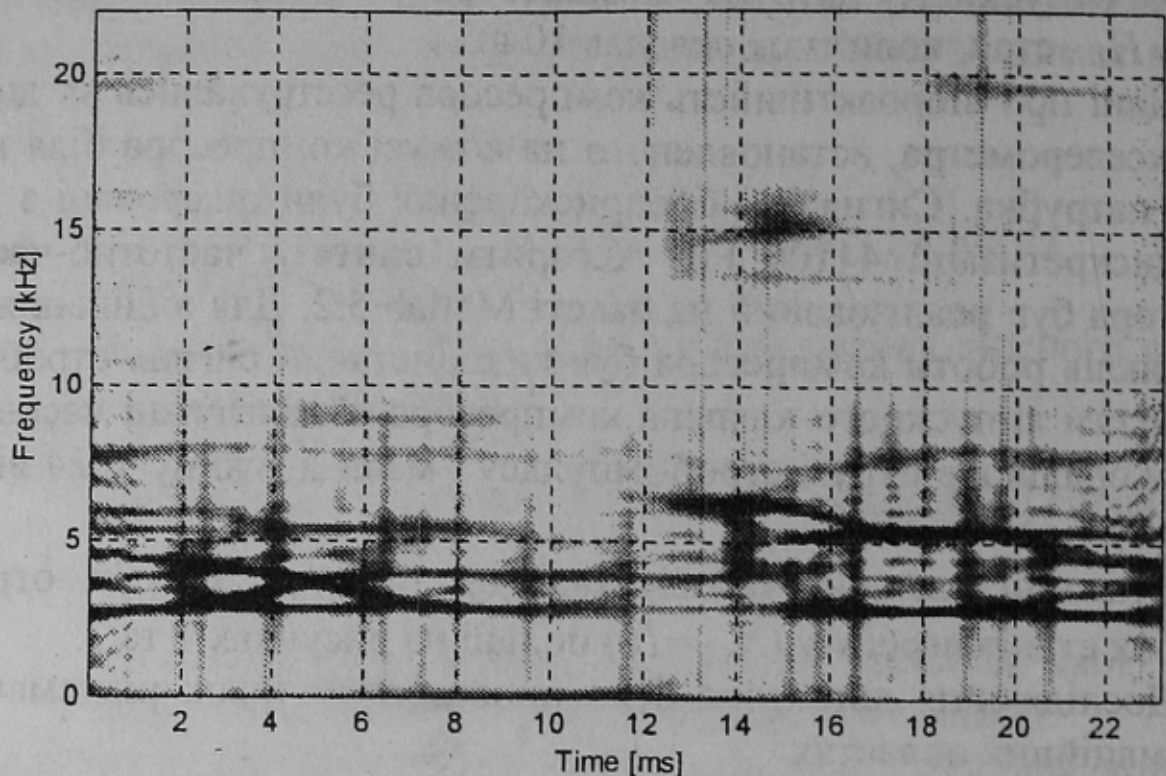


Рисунок 2 - Усереднений ЧЧР Цзуя-Уільямса для стану H_1 (тиск 10 аті)

Для випадків використання кожної з областей було отримано результати детектування тренувальних даних з нульовим та одиничним. Було прийнято гіпотезу про те, що отримані результати для кожного стану підпорядковуються нормальному закону розподілу. Робочі характеристики детектора для цих трьох варіантів подано на рис. 3.

Висновки

Показано, що метод частотно-часового аналізу нестационарних вібрацій МЗПД може бути застосований для побудови частотно-часового квадратичного детектора, що забезпечує ухвалення рішення про технічний стан вузлів машини.

Наведено, що ефективність частотно-часового детектора істотно залежить від обраної інформаційної області в частотно-часовому зображенні сигналу. Вибір інформаційної області може здійснюватися на підставі аналізу діагностичної моделі машини, що встановлює зв'язок між показниками технічного стану та показниками вібрацій.

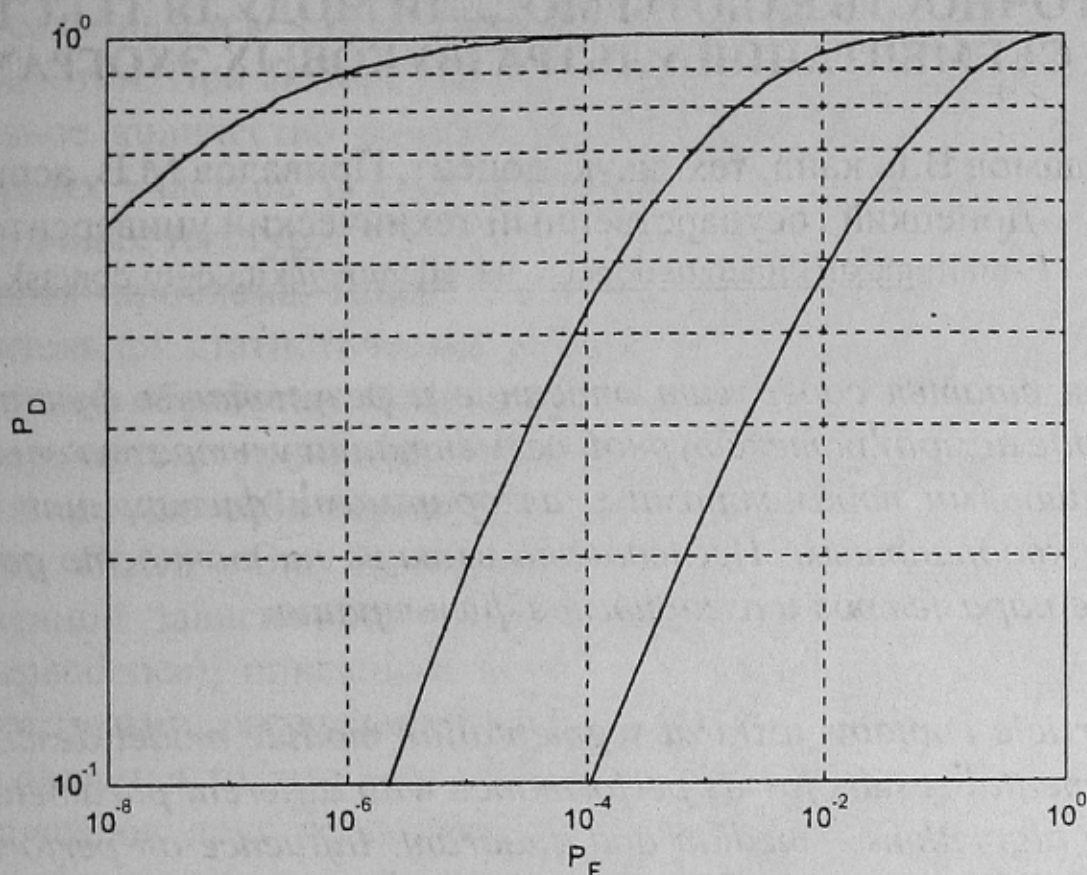


Рисунок 3 - Робочі характеристики детектору

Описано алгоритм синтезу частотно-часового детектора для контролю технічного стану МЗПД і подано результати його реалізації для посередньої оцінки тиску, що розвиває поршневий компресор, за результатами ЧЧА його вібрацій.

Перелік посилань.

1. Явленский К.Н., Явленский А.К. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем. - Л.: Машиностроение, 1985. - 240 с.
2. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. - М.: Сов. радио, Том 1, 1977. - 744 с.
3. Matz G., Hlawatch F. Time-Frequency formulation and design of optimal detectors. Proc. IEEE-sp. Time-Frequency and Time-Scale Analysis, Paris, June, 1996.
4. Коэн Л. Время-частотные распределения: Обзор// ТИИЭР, 1989. Том 77, №10. - С. 72-120.
5. Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. Цифровая обработка сигналов. - М.: Связь, 1979. - 416 с.