

ПУСТОВИЙ С.О., канд. техн. наук  
НАЛІСНИЙ М.Б.

## МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОЇ СКАЛЯРНО-СПЕКТРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ВІБРОАКУСТИЧНОЇ ДІАГНОСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Відомо, що головною метою технічної діагностики є попередження, пошук і локалізація аварійних станів обладнання. Вибір вібраційних явищ як джерела інформації про технічний стан силового обладнання обумовлений наступними причинами: вібрація відбиває найбільш істотні фізичні процеси, що відбуваються усередині обладнання, такі як деформація і напруга в деталях; вібрація обладнання свідчить про процеси взаємодії деталей, причому вібраційні параметри характеризують як обладнання в цілому, так і властивості його окремих вузлів; вібрація має широкий спектр частот, характеризується значною швидкістю поширення та великою ємністю як носія інформації; параметри вібрації (вібро-розсув, віброшвидкість, віброприскорення) можуть реєструватися в природних умовах роботи обладнання. Широке застосування методів віброакустичної діагностики обладнання дозволяє перейти від експлуатації обладнання за ресурсом до його експлуатації за фактичним технічним станом.

На сьогодні відомо досить багато методів та алгоритмів обробки віброакустичної діагностичної інформації [1-3]. В переважній більшості зазначені алгоритми потребують потужних обчислювальних апаратних засобів і відповідно – часу на отримання кінцевого результату. Авторами статті пропонується методика оперативної скалярно-спектральної обробки віброакустичної діагностичної інформації, яка реалізована ними у вигляді пакету спеціалізованого програмного забезпечення. Безумовно, для розробки представленої методики обробки вібропараметрів були застосовані відомі математичні прийоми. Але на відміну від існуючих, представлена нижче методика, на думку авторів, включає мінімальний набір ефективних розрахункових залежностей, що дозволяють легко перетворити вихідну віброакустичну інформацію в скалярну та спектральну форми, придатні для прийняття оперативних діагностичних рішень, як при рішенні завдання безперервного моніторингу технічного стану обладнання,

так і його детального діагностування.

Вихідними даними при проведенні скалярно-спектрального аналізу технічного стану обладнання, безумовно, є часова вибірка (хвиля) миттєвих значень вібропараметру та її характеристики (рис.1). До основних характеристик часової вибірки відносяться:

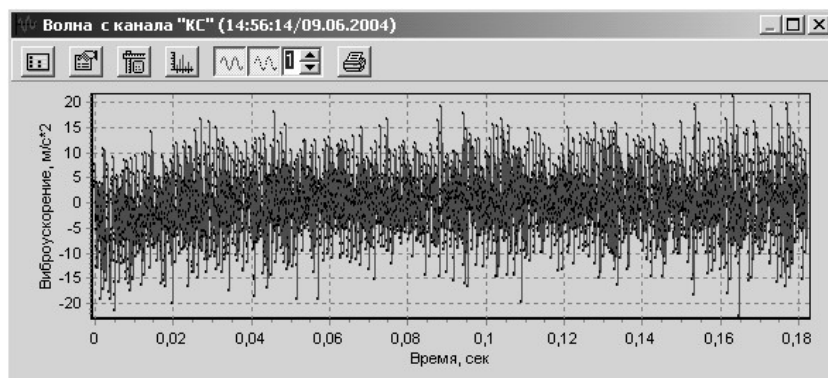


Рис.1. Часова вибірка вібропараметру

- обсяг вимірюваної часової вибірки (хвилі)  $N$ , або її "глибина"  $d$ ;
- часовий інтервал між точками у вибірці  $\Delta t$ ;
- час знімання хвилі  $t_c$ .

Обсяг вимірюваної часової вибірки (хвилі)  $N$  визначає частотний діапазон аналізу, розподільну здатність спектру, кількість ліній в спектрі та, звичайно, обсяг необхідних математичних розрахунків:

$$N = 2^d, \quad (1)$$

де  $d = 1, 2, 3, \dots$  – “глибина” часової вибірки.

Величина  $N$  обирається в залежності від завдань, що вирішуються. Наприклад, для вирішення завдання оперативного моніторингу технічного стану обладнання  $N = 1024 \dots 16384$ , для вирішення завдання детального діагностування обладнання  $N = 32768 \dots 1048576$  і більше.

Часовий інтервал між точками у вибірці:

$$\Delta t = 1 / F_D \quad [c], \quad (2)$$

де  $F_D$  – частота дискретизації часового сигналу аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) [Гц].

Частоту дискретизації вимірюваного часового сигналу обирають в залежності від частотного діапазону, який досліджується. Наприклад, якщо необхідно провести аналіз в низькочастотному діапазоні, то обирається невисока частота дискретизації, та навпаки.

Обсяг вимірюваної часової вибірки та частота її дискретизації визначають час знімання хвилі:

$$t_c = \Delta t \cdot (N - 1) \quad [c]. \quad (3)$$

Зареєстрований часовий сигнал (рис.1) дозволяє перш за все провести його скалярний аналіз.

Параметры	СКЗ	Пик-пик	Среднее	Пик
Значения, [м/с*2]	6,25	43,60	0,00	22,48

До основних скалярних параметрів вібросигналів відносяться (рис.2):

- середньоквадратичне

значення (СКЗ) вібропараметру  $\psi$ ,

- середнє значення вібро-

параметру  $\mu$ ;

- пік (амплітуда)  $P$ ;

- пік-пік (розмах)  $PP$ .

Середньоквадратичне значення часової вибірки розраховується за формулою:

$$\psi_x = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2} \quad [B], \quad (4)$$

де  $x_i$  -  $i$ -те значення з  $N$  складових часового сигналу.

При розрахунку скалярних параметрів вібросигналу доцільно використовувати їх усереднення за часом (наприклад, при вирішенні завдання моніторингу). Це дозволяє згладити випадкові флуктуації вібросигналу. В цьому випадку, середнє значення вібросигналу розраховується як:

$$\mu = \frac{\bar{\mu}_t}{\eta} + \delta \quad [мм/с], \quad (5)$$

де  $\eta$  - чутливість вібродатчика  $[\frac{B}{мм/с}]$ ;

$\delta = \rho / \eta$  - зсув вібродатчика [мм/с];

$\rho$  - зсув вібродатчика [В];

$\bar{\mu}_t = a_x \cdot \mu_t + (1 - a_x) \cdot \bar{\mu}_{t-1}$  - поточне усереднене значення середнього [В];

$\bar{\mu}_{t-1}$  - попереднє усереднене значення середнього [В];

$a_x = 1 - e^{-T_{\text{шт}}/t_x}$  - постійна усереднення (експоненційне усереднення);

$T_{АЦП}$  - час циклу АЦП [200...1000 мс];

$t_x$  - постійна часу усереднення [200...60000 мс];

$$\mu_t = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i}{N} - \text{поточне значення середнього [В];}$$

$x_i$  –  $i$ -те значення з  $N$  складових часового сигналу, зібраних за час  $T_{АЦП}$ .

З урахуванням формул (5), усереднене середньоквадратичне значення за часовим сигналом:

$$\psi = \frac{\bar{\psi}_t}{\eta} \quad [\text{мм/с}], \quad (6)$$

де  $\bar{\psi}_t = a_x \cdot \psi_t + (1 - a_x) \cdot \psi_{t-1}$  - поточне усереднене значення СКЗ [В];

$\bar{\psi}_{t-1}$  - попереднє усереднене значення СКЗ [В];

$$\psi_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \mu_t)^2}{N}} - \text{поточне значення СКЗ [В].}$$

Усереднене значення пік (амплітуда) вібросигналу:

$$P = \frac{\bar{P}_t}{\eta} \quad [\text{мм/с}], \quad (7)$$

де  $\bar{P}_t = \text{Max}\{\bar{P}_t^{\text{max}}, \bar{P}_t^{\text{min}}\}$  - поточне усереднене значення пік [В];

$\bar{P}_t^{\text{max}} = a_x \cdot P_t^{\text{max}} + (1 - a_x) \cdot \bar{P}_{t-1}^{\text{max}}$  - поточне усереднене максимальне значення пік [В];

$\bar{P}_t^{\text{min}} = a_x \cdot P_t^{\text{min}} + (1 - a_x) \cdot \bar{P}_{t-1}^{\text{min}}$  - поточне усереднене мінімальне значення пік [В];

$\bar{P}_{t-1}^{\text{max}}, \bar{P}_{t-1}^{\text{min}}$  - попереднє максимальне і мінімальне усереднені значення пік відповідно [В];

$P_t^{\text{max}} = \text{Max}\{|x_i, i = \overline{0, N-1}| - \mu_t\}$  - поточне максимальне значення пік [В];

$P_t^{\text{min}} = \text{Min}\{|x_i, i = \overline{0, N-1}| - \mu_t\}$  - поточне мінімальне значення пік [В].

Усереднене значення пік-пік (розмах) вібросигналу:

$$PP = \frac{\overline{PP}_t}{\eta} \quad [\text{мм/с}], \quad (8)$$

де  $\overline{PP}_t = \bar{P}_t^{\text{max}} - \bar{P}_t^{\text{min}}$  - поточне усереднене значення пік-пік [В].

Параметры	СКЗ	Пик-пик	Среднее	Пик	Куртозис	Skew	RMS V by A
<b>Зарегистрированные и пороговые уровни скалярных параметров:</b>							
Текущие, [м/с*2]	14,82	6,25					43,60
<b>Пороговые уровни параметров</b>							
Предупредительный	10	30					90
Аварийный	20	40					120

Рис.3. Порівняння чисельних значень скалярних параметрів з заданими пороговими рівнями

Після розрахунку чисельних значень скалярних параметрів (4)-(8) виконується їх порівняння з пороговими попереджувальним та аварійним рівнями (рис.3) для прийняття діагностичних рішень.

Спектральний аналіз часової вибірки рис.1, з математичної

точки зору, є більш складним в порівнянні з скалярним аналізом. Перш за все розраховуються характеристики спектру, що будується. До основних характеристик спектру відносяться:

- частотна розподільна здатність  $\Delta f$ ;
- число ліній у спектрі  $L$ ;
- права границя спектру  $F_{max}$ .

Частотна розподільна здатність безпосередньо визначає ширину однієї лінії спектра:

$$\Delta f = 1 / (\Delta t \cdot N) = F_D / N \quad [\text{Гц}]. \quad (9)$$

Число ліній у спектрі:

$$L = N / 2. \quad (10)$$

Необхідно зауважити, що згідно з правилом Найквіста [1], для усунення неточності в визначенні складових спектру біля правої границі спектру, кількість ліній  $L$  доцільно зменшити до  $N / 2,56$ .

Права границя спектра:

$$F_{max} = \Delta f \cdot L = F_D / 2 \quad [\text{Гц}]. \quad (11)$$

З формули (11) можливо визначити потрібний обсяг часової вибірки, якщо відомі необхідний для аналізу спектральний діапазон  $F_{max}$  та частота дискретизації АЦП:

$$N = F_D \cdot L / F_{max}. \quad (12)$$

У зв'язку з тим, що знята АЦП часова вибірка вібропараметру має обмежений обсяг ( $N < \infty$ ), для зменшення викривлення шуканого спектру, необхідно застосувати так зване вагове вікно:

$$x_i^w = x_i \cdot w[i] \quad [\text{В}], \quad i = \overline{0, N-1}, \quad (13)$$

де  $w[i]$  -  $i$ -ті елементи обраного вагового вікна.

Згідно (13), відсутність вагового вікна відповідає застосуванню прямокутного вікна:

$$w[i] = 1.0, \quad i = \overline{0, N-1}. \quad (14)$$

Найбільше застосування в практиці спектральної обробки вібропараметрів знайшли вагові вікна:

- Хана  $w[i] = 0.5 - 0.5 \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{N}$  або  $w[i] = \sqrt{\frac{8}{3}} \cdot \cos^2 \left( \frac{\pi \cdot i}{N} \right)$ ,  $i = \overline{0, N-1}$ ;

- Хемінга  $w[i] = 0.54 - 0.46 \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{N}$ ,  $i = \overline{0, N-1}$ ;

- трикутне  $w[i] = 1 - \left| \frac{2 \cdot i - N}{N} \right|$ ,  $i = \overline{0, N-1}$ ;

- плосковершинне  $w[i] = a_0 - \left( a_1 \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{N} + a_2 \cdot \cos \frac{4 \cdot \pi \cdot i}{N} \right)$ ,  $i = \overline{0, N-1}$ ,

де  $a_0 = 0.2810638602$ ;  $a_1 = 0.5208971735$ ;  $a_2 = 0.1980389663$ ;

- експонентне  $w[i] = e^{\left( \frac{i \cdot \ln(f)}{N-1} \right)} = f^{\left( \frac{i}{N-1} \right)}$ ,  $i = \overline{0, N-1}$ ,

де  $f$  – кінцеве значення вагового вікна (наприклад,  $f = 0.1$ ).

Після застосування вагового вікна за формулою (13), можливе безпосереднє виконання швидкого перетворення Фур'є для отримання комплекснозначної величини амплітуди  $i$ -ої гармоніки в спектрі вібрації (амплітуди) за формулою:

$$A_i^f = \sum_{k=0}^{N-1} x_k^w \cdot e^{-j \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot i \cdot k}{N} \right)} = \sum_{k=0}^{N-1} x_k^w \cdot \left[ \cos \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot i \cdot k}{N} \right) - j \cdot \sin \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot i \cdot k}{N} \right) \right] \quad [B], \quad (15)$$

де  $A_i^f = A_i^R + A_i^{Im}$ ,  $i = \overline{0, N-1}$ ;

$A_i^R$ ,  $A_i^{Im}$  - дійсна і мніма частини амплітуди  $i$ -ої гармоніки частоти  $i \cdot \Delta f$  Гц відповідно [B].

Тоді амплітуда  $i$ -ої гармоніки в спектрі вібрації (амплітуди):

$$A_i = \sqrt{\frac{(A_i^R)^2 + (A_i^{Im})^2}{N}} / \eta \quad [MM/C], \quad (16)$$

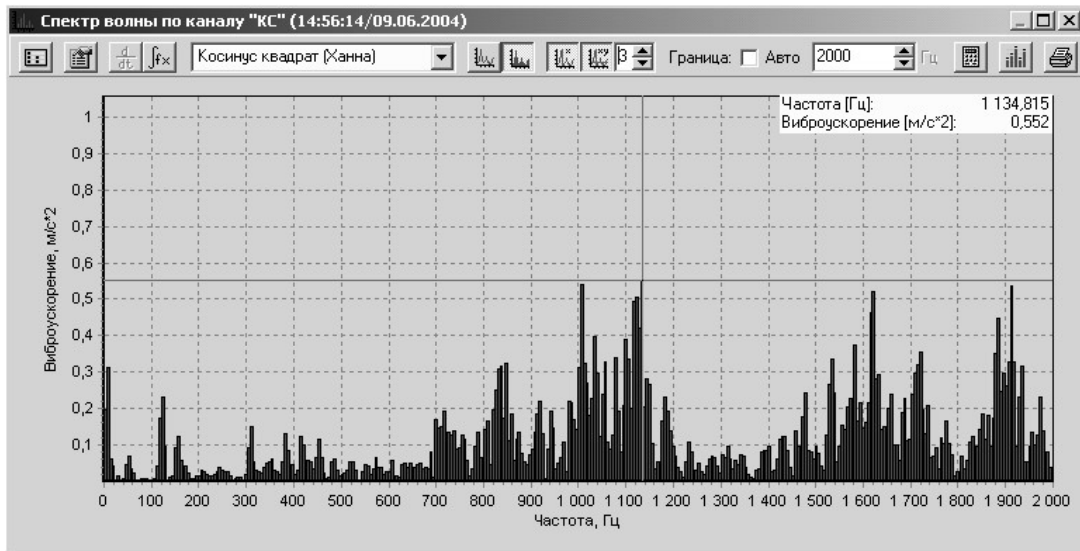


Рис.4. Розрахований спектр амплітуди вібропараметру

Знаючи амплітуди  $A_i$  (рис.4), можливо розрахувати СКЗ (4)-(5) по спектру амплітуди (спектру вібрації) за формулою:

$$\psi_{f_A} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} A_i^2} \quad [MM/C]. \quad (17)$$

При цьому повинна виконуватись умова рівності СКЗ у часовій і частотній області:

$$\psi = \psi_{f_A} \quad [MM/C]. \quad (18)$$

Аналогічно скалярному аналізу, для усунення випадкових флуктуацій доцільно виконувати усереднення спектра (наприклад, при вирішенні завдання моніторингу):

$$\overline{A_i^t} = a \cdot A_i + (1-a) \cdot \overline{A_i^{t-1}} \quad [MM/C], \quad i = \overline{0, N-1} \quad (19)$$

де  $\overline{A_i^t}$  - усереднене значення амплітуди  $i$ -ої лінії спектра [MM/C];

$A_i$  - поточне значення амплітуди  $i$ -ої лінії спектра [MM/C];

$\overline{A_i^{t-1}}$  - попереднє значення амплітуди  $i$ -ої лінії спектра [MM/C];

$(1-a)$  - величина перекриття спектра;

$a = 1 - \frac{k_n}{100\%}$ ,  $k_n$  - коефіцієнт перекриття [%].

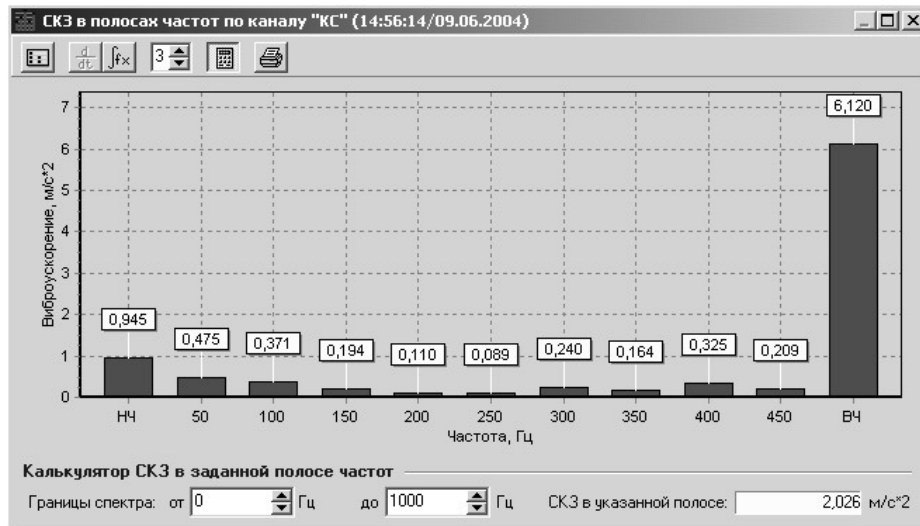


Рис.5. Розраховані значення СКЗ вібропараметру в смугах частот

В ряді випадків для рішення завдання діагностування необхідним є розрахунок СКЗ у смузі частот  $f_1 - f_2$  (рис.5):

$$\psi_{f_1, f_2} = \sqrt{\sum_{i=n_1}^{n_2} A_i^2} \quad [\text{мм/с}], \quad (20)$$

де  $n_1 = L \cdot \frac{f_1}{F_{\max}} = \frac{f_1}{\Delta f}$  – лінія спектра, що відповідає нижній  $f_1$  границі частотної смуги спектра;

$n_2 = L \cdot \frac{f_2}{F_{\max}} = \frac{f_2}{\Delta f}$  – лінія спектра, що відповідає верхній  $f_2$  границі частотної смуги спектра.

Якщо з АЦП поступає сигнал віброшвидкості, то можливо одержати спектр віброзсуву або спектр віброприскорення за допомогою операцій інтегрування та диференціювання відповідно:

$$A_i^{\int} = \frac{A_i}{2 \cdot \pi \cdot f_i} \quad [\text{мм}], \quad i = \overline{0, N-1} \quad (21)$$

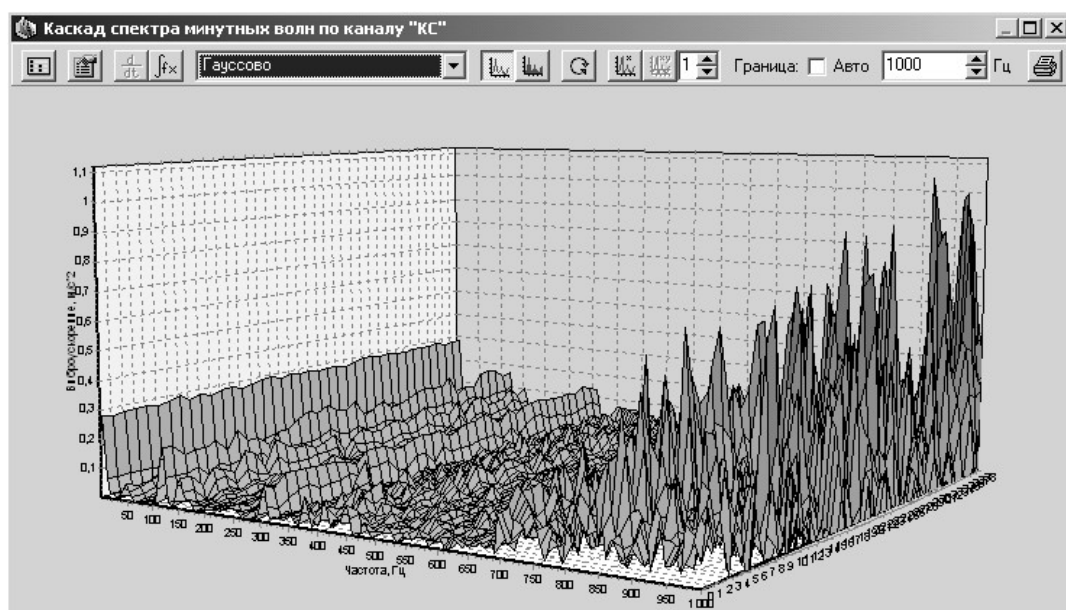


Рис.6. Каскад спектра амплітуди вібропараметру

де  $A_i^{\int}$  - значення амплітуди поточної лінії проінтегрованого спектра [мм];

$A_i$  - значення амплітуди поточної лінії вихідного спектра [мм/с];

$f_i = \Delta f \cdot (i + 1)$  – частота поточної лінії спектра.

$$A_i' = A_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_i \quad [\text{мм/с}^2], \quad i = \overline{0, N-1} \quad (22)$$

де  $A_i'$  - значення амплітуди поточної лінії продиференційованого спектра [мм/с<sup>2</sup>].

Якщо часові вибірки (рис.1) з певною періодичністю фіксуються в базі даних вимірювань, то за допомогою формул (9)-(22) можливо виконати їх послідовну обробку з метою побудови каскаду спектра. Каскад спектра (рис.6) дає додаткову діагностичну інформацію про розвиток несправності в часі.

Аналогічно порівнянню чисельних значень скалярних параметрів з їх пороговими рівнями (рис.3), можливе порівняння розрахованих спектрів рис.4, 6 з граничними профілями еталонних спектрів справного обладнання, або профілями еталонних спектрів характерних несправностей обладнання для прийняття відповідних діагностичних рішень.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. - Пермь.: ПВФ "Вибро-Центр", 1996. – 176 с.
2. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. - М.: Мир, 1990. – 438 с.
3. Диментберг Ф. М., Колесников К. С. Вибрации в технике. Справочник. - М.: Машиностроение, 1980. - Т.3. - 544 с.