

УДК 621.891.22

М.І. Суханов, А.В. Приймак, К.М. Божевільний, О.О. Панкевич, А.Г. Новосельцева

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ІНФОРМАТИВНОГО ПАРАМЕТРУ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ПРОЦЕСІВ ЗНОШУВАННЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

*У статті розглянуті основні принципи вибору параметрів акустичної емісії при дослідженні динаміки процесів зношування трибоспряжень авіаційної техніки.*

**Ключові слова:** акустичне емісійне випромінювання, інтенсивність зношування, інформативний параметр.

### Вступ

Бурхливий розвиток обчислювальної техніки, статистичних методів аналізу параметрів акустичного емісійного випромінювання, поставили в порядок денний розробку автоматизованих систем безперервного контролю за процесами зношування в реальному масштабі часу проведення випробувань, що дозволяють контролювати знос у всьому динамічному діапазоні від відділення першої частки зносу до величини інтенсивності зношування, властивій перехідним режимам, а також на сталих режимах їхньої роботи. Методичну основу автоматизованих систем обробки акустичного емісійного випромінювання складають методи цифрової обробки “відео-сигналу”, де під “відеосигналом” мається на увазі сигнал будь-якої фізичної природи – переносник візуальної інформації [1].

Ключовим питанням при розробці автоматизованих систем є обґрунтований вибір критерію акустичного емісійного випромінювання, що найбільш точно враховує зв'язок процесів руйнування зі структурою поверхонь тертя.

Це і є метою даної роботи.

### Основний розділ

Проаналізуємо акустичну емісію, що виникає при поверхневому руйнуванні матеріалів при терті.

Потік акустичної енергії від безлічі елементарних джерел створює в крапці закріплення пьезопретворювача Р поле з повною амплітудою А, що виникає в результаті суперпозиції великого числа елементарних сферичних хвиль з амплітудами  $A_n$  і фазами  $\varphi_n$  від елементарних джерел  $\Delta S$  при їхньому зрізі

$$A(P) = \sum A_n(P) \exp(i\varphi_n(P)), \quad (1)$$

де  $\varphi_n(P)$  – фаза n-ої хвилі джерела  $\Delta S$ .

Фаза  $\varphi_n(x_n, t)$  залежить від відстані  $x_n$  від джерела і від частоти  $\omega$ .

Як відомо [2], для випадку негармонійних хвиль

інтерференційна картина цілком відсутня, а середнє значення щільності енергії виявляється пропорційним сумі квадратів амплітуд складових хвиль, тобто має місце енергетичне додавання хвиль.

Крім того, при порушенні в середовищі одночасно безлічі хвиль від елементарних джерел вони не поширюються незалежно, а породжують нові хвилі комбінаційного типу, частоти яких дорівнюють сумі і різниці частот вихідних хвиль [3]. Таким чином, випромінювання проявляється у виді акустичних коливань із широким частотним спектром.

Ефективність оцінки інтенсивності зношування по параметрах АЕ в значній мірі визначається обґрунтованістю їхнього вибору для стаціонарних і нестаціонарних режимів роботи трибоспряження. Аналіз літературних даних по цьому питанню свідчить про перспективність використання енергетичних і статистичних параметрів АЕ [4] для цих цілей, взаємозв'язок яких з інтенсивністю зношування дотепер не вивчено.

Для обґрунтування вибору інформативних параметрів АЕ при контролі процесів зношування у фрикційних вузлах амплітуда акустичних сигналів  $X(t)$  може бути задана як функція дійсної перемінної t.

Припустимо, що середнє значення інтенсивності сигналу, що пропорційно  $|\delta|^2$ , прагне до кінцевої величини, коли інтервал, по якому проводиться усереднення, є нескінченним.

Тоді ліміт

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |X(t)|^2 dt - \quad (2)$$

кінцевий.

Якщо при цьому ліміт не дорівнює нулю, то безперечно, що інтеграл (2) розходиться. Для того, щоб у даному виразі можна було використовувати методи спектрального аналізу, введемо поняття обрізної функції  $X_T(t)$  [2]:

$$X_T(t) = X(t), \text{ якщо } |t| \leq T; \quad (3)$$

$$X_T(t) = 0, \text{ якщо } |t| > T. \quad (4)$$

Оскільки при будь-яких значеннях  $T$  функція  $X_T$  є квадратично інтегруєма, можна визначити відповідний Фур'є образ:

$$X_T(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X_T(t) \exp(i\omega t) dt = \int_{-T}^T X(t) \exp(i\omega t) dt. \quad (5)$$

Вважаємо, що функція  $X(t)$  належить ансамблю функцій за результатами безлічі вимірів, що характеризують статистичні властивості процесу поверхневого руйнування.

Якщо розглянутий процес є стаціонарним і ергодичним, то автокореляційна функція  $G(\tau)$  для сигналу  $X(t)$  визначається виразом:

$$G(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t) X(t + \tau) dt. \quad (6)$$

Спектральна функція  $W(\omega)$  сигналу  $X(t)$  визначається як Фур'є образ автокореляційної функції  $G(\tau)$  і записується у вигляді

$$W(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\tau) \exp(i\omega \tau) d\tau. \quad (7)$$

Існує зворотнє перетворення:

$$G(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) \exp(i\omega \tau) d\omega. \quad (8)$$

З цього виразу і виразу (2) при  $\tau = 0$  одержуємо, що:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |X(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) d\omega, \quad (9)$$

відкіля випливає, що

$$W(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{|X_T(\omega)|^2}{2T} \right\}, \quad (10)$$

де оператор  $E$  позначимо як середнє по ансамблю статичної змінної:

$$\left[ \frac{X_T(\omega)^2}{2T} \right]. \quad (11)$$

З виразів (8) і (9) очевидно, що функція  $W(\omega)$  є спектром потужності сигналу  $X(t)$ , що являє собою відношення квадрата модуля Фур'є образу  $X(t)$  сигналу до інтервалу  $2T$ , протягом якого вимірюється сигнал.

При цьому вираз (9) показує, що середня інтенсивність зношування  $J_h$  дорівнює інтегралу від спектра потужності. Повертаючись до виразу (1), варто очікувати найкращі показники взаємозв'язку між інтенсивністю зношування і спектральною потужністю сигналів АЕ, що знайшло своє підтвердження в аналізі експериментальних досліджень, як для нестационарних, а за певних умов і для стаціонарних режимів роботи трібосистеми.

Дійсно, оскільки нестационарний процес характерний тим, що має визначену тенденцію розвитку в часі, то характеристики такого процесу залежать від початку відліку і від часу [5]. Однак для кожного нестационарного процесу існують відрізки часу, у межах яких з відомим наближенням даний процес може вважатися стаціонарним і ергодичним.

Таким чином, змінюючи інтервал інтегрування (задаючи досить малий інтервал) при вимірі спектральної потужності АЕ, можливе вивчення процесів поверхневого руйнування на етапі прироблення вузлів тертя.

Випадкова функція  $X(t)$  може вважатися по визначенню [5] стаціонарною, якщо всі її вірогіднісні характеристики не міняються при будь-якій зрушенні аргументів, від яких вони залежать, по осі  $t$ . Однак одне з основних умов, якому повинна задовольняти випадкова стаціонарна функція – це умова сталості дисперсії:

$$D_x(t) = D_x = \text{const.}$$

Стосовно до акустичного випромінювання сталість дисперсії зміни спектральної потужності сигналів АЕ є достатньою умовою стаціонарності процесу поверхневого руйнування, що є джерелом АЕ.

Як показано в роботах [4, 6], вивчення спектрального складу коливань подає важливу інформацію про переважні механізми руйнування.

Відповідно до теореми про дисперсію лінійної функції випадкових некорельованих величин [6], дисперсія стаціонарної випадкової функції дорівнює сумі дисперсій усіх гармонік її спектрального розкладання.

Розіб'ємо частотний діапазон реєстрації сигналів АЕ на ділянки. Позначимо відстань між сусідніми ділянками  $\Delta\omega$ . Виміримо дисперсії зміни амплітуди АЕ на кожній ділянці і побудуємо діаграму, висота якої на кожній ділянці  $\Delta\omega$  дорівнює

$$s_x(\omega_x) = D_x / \Delta\omega \quad (12)$$

і представляє середню щільність дисперсії на цій ділянці.

Якщо необмежено зменшувати інтервал  $\Delta\omega \rightarrow 0$ , то східчаста діаграма необмежено наближається до плавної кривої  $S_x(\omega)$ , що представляється як спільний амплітудно-часовий розподіл.

По цій характеристиці, видимо, з великою вірогідністю можна судити про кінетику протікання процесу поверхневого руйнування, зв'язаного зі змінною структури поверхневих шарів [7], що є невід'ємною складовою процесу прироблення фрикційних вузлів.

Дискретні сигнали спектральної потужності АЕ ( $\omega_x$ ) вимірюються і перетворюються за допомогою цифрових і логічних пристроїв. У них сигнал представляється у вигляді доз (квантів). Рівень їх зміню-

ється стрибкоподібно і зберігається протягом деякого малого часу незмінним.

Пристрої дискретної дії дозволяють одержати більш точне відтворення сигналу і менш піддані впливу перешкод.

У приладі АЭ-109М, що був у використанні авіаторами, таке перетворення виконується двома шляхами.

Один з них – квантування безупинного сигналу за часом, зводиться до заміни нескінченно великого числа значень певним числом миттєвих значень, що фіксуються через визначений проміжок часу  $\Delta t$ . Останній називається кроком квантування за часом. У моменти часу  $t_k$  ( $k=0, 1, 2 \dots m$ ) фіксоване значення  $f(t_k)$  дорівнює величині сигналу спектральної потужності в даній точці.

Усередині кроку квантування  $\Delta t$  між сусідніми фіксованими значеннями аналого-цифровий блок формує черговий сигнал, що передається на пристрій, що реєструє, з точністю, що визначається частотою квантування  $f_k=1/\Delta t$ .

Частота квантування визначалася на підставі теореми В.А. Котельникова [2].

У теоремі В.А. Котельникова розглядається безупинна функція, необмежена в часі, тобто що має обмежений спектр частот.

Доведено, що будь-яка функція, що містить частоти від 0 до  $f_{\max}$ , може бути представлена з будь-якою точністю у вигляді суми :

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} f(t_k) \frac{\sin \left[ 2\pi f_{\max} \left( t - \frac{k}{2} \cdot f_{\max} \right) \right]}{2\pi \cdot f_{\max} \cdot \left( t - \frac{k}{2} \cdot f_{\max} \right)}. \quad (13)$$

Таку функцію можна передавати з будь-якою точністю за допомогою чисел, або аналогових сигналів фіксованого рівня, що прямують друг за другом через інтервали часу

$$\Delta t = 0,5 f_{\max}. \quad (14)$$

З урахуванням цього, вираз (1) представляється у такий спосіб:

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} f(k \cdot \Delta t) \cdot \frac{\sin \left[ \frac{\pi}{\Delta t} (t - k \cdot \Delta t) \right]}{\frac{\pi}{\Delta t} (t - k \cdot \Delta t)}. \quad (15)$$

Нескінченна сума (15) у кожен момент часу  $k \cdot \Delta t$  буде містити лише один доданок, рівний істинному значенню функції в цей момент, а інші доданки обертаються в нуль.

У формулі (15)  $t = k \cdot \Delta t$  у доданка з порядковим номером  $k$ . Для нього після підстановки  $t$  одержуємо невизначеність типу  $0/0$ , що перетворюється після розкриття в одиницю.

Чисельник інших доданків дорівнює нулю, тому що аргумент виходить кратним  $\pi$ , а знаменник цих доданків завжди відмінний від нуля.

Функція  $f(t)$  замінюється безліччю функцій, кожна з яких має значення  $f(t)$  для «власного» моменту часу.

Усередині інтервалу  $\Delta t$  величина функції визначається сумою складових приблизно.

Таким чином, при частоті квантування  $f_k=2f_{\max}$  функція, що містить обмежений спектр частот, відтворюється абсолютно точно.

Крок квантування визначається за виразом (2).

Характер зміни сигналу, реєструемого по даному каналу, найбільш повно відбиває динаміку процесів зношування, безпосередньо зв'язану зі структурними перетвореннями в поверхневому шарі трібосполучення.

З метою реєстрації подібного роду змін, сигнали акустичної емісії по цьому каналі обмежуються по амплітуді рівнем, зв'язаним з роботою трібосполучення машини тертя.

Інший шлях – квантування за рівнем - зводиться до заміни поточних значень безупинного сигналу кінцевим числом його рівнів. Сигнал  $f(t)$  у результаті квантування замінюється східчастою функцією  $\Psi[f(t)]$ .

Остання залежить від характеру квантуемого сигналу. Поки сигнал не зміниться на величину  $\Delta f(t)$ , перетворювач фіксує попереднє значення його рівня. Тільки після досягнення сигналом нового рівня перетворювач фіксує цей рівень.

Якщо в інтервалі зміни часу від  $t$  до  $t_n$  збільшення сигналу досягає рівня квантування, то сигнал обнуляється і здійснюється наступний набір. Крок квантування фіксується і може змінюватися в залежності від інтенсивності наростання величини збільшень  $f(t)$ .

Реєстрація функції  $\Psi[f(t)]$  проводиться при фіксованій швидкості реєстрації.

Ширина інтервалу часу  $t + \Delta t$  відповідно до виразу для визначення спектральної потужності (10) характеризує інтенсивність процесів поверхневого руйнування.

Рівень квантування відповідає фіксованій величині зносу згідно виразу (9):

$$I_{\text{н.кв.}} = W(\omega) \cdot a, \quad (16)$$

де  $a$  – питома емісійна активність, знайдена за результатами тестового експерименту.

Величина сумарного зносу за будь-який період випробувань може бути розрахована по такій формулі:

$$I_{\Sigma} = W(\omega)_{\text{кв.}} \cdot a \cdot z, \quad (17)$$

де  $z$  – кількість досягнень рівня квантування  $W_x$ .

З виразу (16) може бути визначена питома емісійна активність:

$$a = \frac{I_z}{W_{\text{кв.}}(x) \cdot z} \quad (18)$$

По своєму фізичному змісту питома емісійна активність являє собою величину зносу трібосполучення за інтервал часу набору квантового рівня  $W(\omega)_{\text{кв}}$ .

Однією з головних умов реєстрації спектральної потужності по даному каналу є реєстрація сигналів, відповідних за рівнем процесам поверхневого руйнування. Це обмеження реалізується блоком дискримінації сигналів акустичної емісії по амплітуді.

Аналізуючи визначений цикл квантування сигналу спектральної потужності, слід зазначити, що тангенс кута між лінією набору квантового рівня і відрізком часу характеризує інтенсивність зношування трібосполучення за час набору квантового рівня.

### Висновок

Таким чином, реєструючи спектральну потужність сигналів акустичної емісії, вдається з високою точністю визначити динаміку процесів зношування сполучення на різних етапах його роботи.

Високочастотний широкосмуговий сигнал акустичної емісії, що реєструється при зношуванні тертьових тіл, перетворюється в низькочастотний зі збереженням у ньому статичних характеристик.

### Список літератури

1. Автоматизированные системы обработки изображений (АСОИЗ-81) // Тезисы докл. 1-й Всесоюз. конф. – М.: Наука, 1981. – 276 с.
2. Ультразвук / под ред. И.П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 336 с.
3. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М.: Наука, 1956. – 256 с.
4. Акустические и электрические методы в триботехнике / А.И. Свириденко, Н.К. Мышкин, Т.Ф. Калмыкова, О.В. Холодилов; под. ред. В.А. Белого. – М.: Наука и техника, 1987. – 280 с.
5. Вакар К.Б. Изучение статистических характеристик акустико-эмиссионного излучения / К.Б. Вакар, В.Р. Ржевин // Автоматическая сварка. – 1982. – № 9(354). – С. 39-41.
6. Венцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Венцель. – М.: Наука, 1964. – 576 с.
7. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 478 с.

Надійшла до редколегії 8.06.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Войтов, Національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, Харків.

### ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ИНФОРМАТИВНОГО ПАРАМЕТРА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ИЗНАШИВАНИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

М.И. Суханов, А.В. Приймак, К.М. Божевильный, А.О. Панкевич, А.Г. Новосельцева

*В статье рассмотрены основные принципы выбора параметров акустической эмиссии при исследовании динамики процессов изнашивания трибосопряжений авиационной техники.*

**Ключевые слова:** акустическое эмиссионное излучение, интенсивность изнашивания, информативный параметр.

### GROUND OF CHOICE OF INFORMING PARAMETER OF ACOUSTIC EMISSION OF RADIATION AT RESEARCH OF PROCESSES WEAR OF KNOTS FRICTION OF AVIATION TECHNIQUE

M.I. Sukhanov, A.V. Priymak, K.M. Bozhevil'ny, O.O. Pankevich, A.G. Novosel'ceva

*In the articles the considered basic principles of choice of parameters of acoustic emission are at research of dynamics of processes of wear of tribocouplings of aviation technique.*

**Keywords:** acoustic emission radiation, intensity of wear, informing parameter.