

АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВІБРАЦІЇ

Поджаренко В.О., Васілевський О.М. Вінницький національний технічний університет,
кафедра „Метрологія та промислова автоматика”

Визначення стану електромеханічних систем (ЕМС) і характеру їх зміни є одною з головних задач віброакустичної діагностики ЕМС. Для діагностуючих об'єктів при побудові ЕМС характерним є наявність в більшості випадків математичних описів їх функціонування у вигляді диференціальних рівнянь з вхідними коефіцієнтами, постійними чи змінними. Моделювання такої системи рівнянь дозволяє встановити закономірності зміни характеристик діагностуючого об'єкту в залежності від його стану, появи та рівню розвитку несправностей і, таким чином, виявити характеристики (інформативні ознаки), найбільш чутливі до появи даного типу несправностей.

Загальний електричний заряд пропорційний прискоренню його основи і, відповідно, прискоренню механічних коливань поверховості об'єкту, на якому закріплений акселерометр [1]. Тому, для оцінки динамічних характеристик вимірювального перетворювача вібрації (ВПВ) використаємо диференційне рівняння другого порядку, яке має вигляд:

$$m \frac{d^2 X_s(t)}{dt^2} + c \frac{dX_s(t)}{dt} + kX_s(t) = F(t), \quad (1)$$

де $F(t) = F_0 \sin(\omega t)$ – гармонічна вимушена сила коливань поверховості об'єкту (вхідна величина); F_0 – амплітуда сили; ω – кутова частота вимушеної сили; $X_s(t)$ – механічні коливання інерційної маси; m – маса акселерометра; c – параметр демпфірування; k – еквівалентна жорсткість п'єзоелементів.

Перетворимо диференційне рівняння (1) до вигляду:

$$\frac{d^2 X_s(t)}{dt^2} + 2h \frac{dX_s(t)}{dt} + h_{кр}^2 X_s(t) = \frac{F_0}{m} \sin(\omega \cdot t), \quad (2)$$

де $h = c/2m$ – коефіцієнт демпфірування; $h_{кр} = \sqrt{k/m}$ – критичне значення коефіцієнту демпфірування.

Аналітичний розв'язок диференційного рівняння (2) має наступний вигляд:

$$X_s(t) = \frac{F_0 \left[\frac{\omega \sin\left(t\sqrt{h^2 - h_{кр}^2}\right) \sqrt{h^2 - h_{кр}^2} [2h^2 + \omega^2 - h_{кр}^2]}{e^{ht}} + \sin(\omega \cdot t) [h^2 \omega^2 - h^2 h_{кр}^2 - h_{кр}^2 \omega^2 + h_{кр}^4] \right]}{m(h^2 - h_{кр}^2)(-4h^2 \omega^2 + 2h_{кр}^2 \omega^2 - \omega^4 - h_{кр}^4)} + \frac{F_0 [2h\omega \cos(\omega \cdot t)]}{m(-4h^2 \omega^2 + 2h_{кр}^2 \omega^2 - \omega^4 - h_{кр}^4)}, \quad (3)$$

а графічне представлення рівняння (3) наведено на рис. 1.

Перехідна характеристика $h(t)$ вимірювального перетворення вібрації для нульових початкових умов має вигляд:

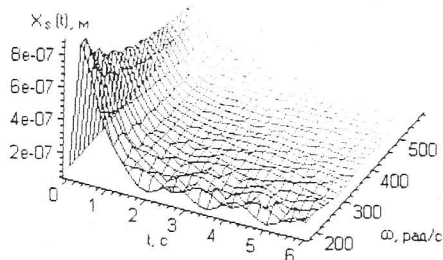


Рис. 1 - Графічне представлення розв'язку диференціального рівняння

$$\frac{d^2 X_s(t)}{dt^2} + 2h \frac{dX_s(t)}{dt} + h_{кр}^2 X_s(t) = \frac{h(t)}{m}. \quad (4)$$

Розв'язавши рівняння (4) отримаємо аналітичну залежність для перехідної характеристики коливної ланки:

$$h(t) = \frac{K_{ВП}}{h_k^2 m} \left\{ 1 - \frac{1}{2} e^{-ht} \sin\left(t\sqrt{h^2 - h_k^2}\right) \cdot \left[1 + \frac{h\left(1 + 2\cos\left(t\sqrt{h^2 - h_k^2}\right)\right)}{\sqrt{h^2 - h_k^2}} - 2\cos\left(t\sqrt{h^2 - h_k^2}\right) \right] \right\}, \quad (5)$$

де $K_{ВП}$ – коефіцієнт віброперетворення.

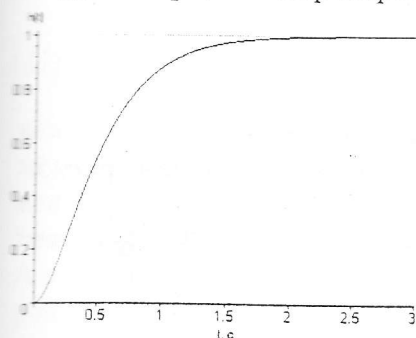


Рис. 2 – Перехідна характеристика вимірювального перетворювача вібрації

Графічне представлення перехідної характеристики вимірювального перетворювача вібрації, що описується рівнянням (5), наведено на рис. 2. Чим швидше перехідна функція наближається до усталеного значення, тим менші інерційні властивості засобу вимірювання. Тому одним із способів нормування динамічних характеристик є визначення тривалості перехідного процесу.

Згідно [2], залежність для визначення тривалості перехідного процесу представимо у вигляді:

$$t_{nn} = -\frac{1}{h} \ln\left(\frac{\delta}{K_{ВП} \sqrt{h^2 - h_k^2}}\right), \quad (6)$$

де δ – нормоване значення абсолютної похибки, при якому закінчується перехідний процес.

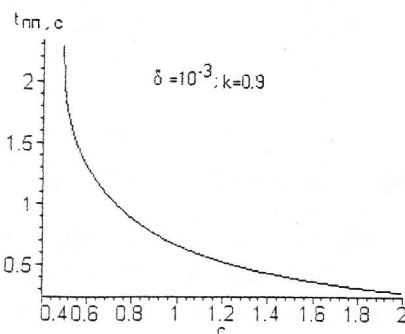
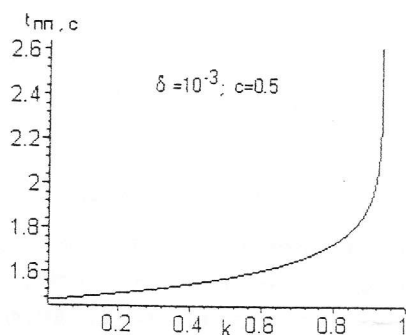


Рис. 3 – Дослідження тривалості перехідного процесу вимірювального віброперетворювача

Аналіз результатів, наведених на рис. 3, дозволяє зробити висновки про те, що у засобах ВПВ, тривалість перехідного процесу зростає із ростом еквівалентної жорсткості п'єзоелементів і зменшується в процесі збільшення параметру демпфірування.

Імпульсна характеристика $\delta(t)$ ВПВ визначається підстановкою функції Дірака замість вхідного сигналу рівняння (2):

$$\frac{d^2 X_s(t)}{dt^2} + 2h \frac{dX_s(t)}{dt} + h_{xp}^2 X_s(t) = \frac{\delta(t)}{m}, \quad (7)$$

розв'язком рівняння (7) є аналітична залежність для імпульсної характеристики ВПВ:

$$\delta(t) = \frac{K_{ВП}}{m\sqrt{h^2 - h_k^2}} e^{-ht} \sin\left(t\sqrt{h^2 - h_k^2}\right). \quad (8)$$

Графічне подання імпульсної характеристики ВПВ наведено на рис. 4.

Для практичних розрахунків динамічних властивостей ВПВ доцільно розглянути окремий випадок передатної функції за умови, коли $s = j\omega$.

В даному випадку перетворення Лапласа замінюється перетворенням Фур'є, а передатна функція $S(s)$ виражається сукупністю амплітудно і фазочастотних характеристик. $S(j\omega)$ – амплітудно – фазова характеристика, яка дає уявлення про частотні властивості ВПВ. Передатна функція перетворювача вібрації має вигляд:

$$S(s) = \frac{K_{ВП}}{m} \cdot \frac{1}{s^2 + 2hs + h_k^2}. \quad (9)$$

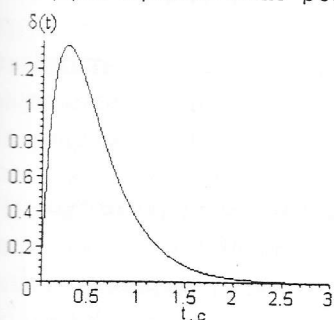


Рис. 4 – Імпульсна характеристика

Перейшовши до частотної області та відокремивши дійсну та уявну частини, отримаємо вирази для амплітудно-частотної:

$$A(\omega) = \frac{K_{ВП}}{\sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)}} = \frac{K_{ВП}}{m\sqrt{\omega^4 + 4h^2\omega^2 - 2h_k^2\omega^2 + h_k^4}} \quad (10)$$

та фазочастотної характеристик:

$$\Phi(\omega) = \arctg\left(\frac{b(\omega)}{a(\omega)}\right) = \arctg\left(\frac{h\omega}{\omega^2 - h_k^2}\right), \quad (11)$$

де $a(\omega)$ і $b(\omega)$ – відповідно дійсна та уявна частина передаточної функції.

Графічне подання амплітудно- та фазочастотної характеристик наведено на рис. 5.

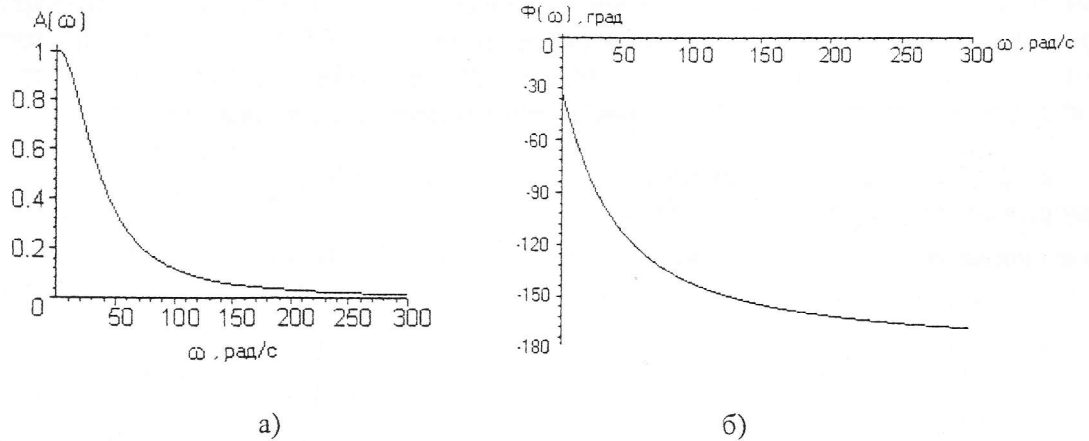


Рис. 5 – Амплітудна (а) та фазова (б) характеристики вимірювального віброперетворювача

Амплітудно-частотна характеристика характеризує спектр частот, що пропускає вимірювальний перетворювач вібрації. Якщо останній має велику інерційність, то він характеризується великою тривалістю перехідного процесу і тому спектр його частот буде знаходитись в області низьких частот. Характерною особливістю амплітудно-частотної характеристики є те, що на високих частотах її легко апроксимувати лінійною залежністю. Це свідчить про високу стабільність в роботі ВПВ. Як видно з рис.5 б, фазочастотна характеристика на високих частотах також не змінюється (виходить на постійне значення), яке можна враховувати при подальшій обробці інформативного сигналу. Різниця частот амплітудного і фазового резонансів збільшується із збільшенням демпфірування. Таким чином, найбільш чутливою величиною, що значною мірою впливає на вихідний сигнал, є демпфірування. Тому різка зміна останнього (в сторону зменшення) призведе до появи несправності у вимірювальному каналі вібрації.

Отже, використання описаного аналізу дає можливість експериментальним шляхом будувати функціональні залежності між інформативними ознаками та параметрами об'єкта. За допомогою отриманих аналітичних залежностей можна одержати кількісну оцінку динамічних метрологічних характеристик вимірювального перетворювача вібрації. Аналіз цих характеристик дає можливість виявити причини підвищеної похибки, і відповідно вказати шляхи їх усунення.

Список літератури

1. Серридж М., Лихт Т. Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и преусилителям. – Глоуструп: Изд-во «Ларсен и сын», Дания 1987. – 186 с.
2. Володарський Є.Г., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. – Вінниця: Велес, 2001. – 219 с.