

# АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИДІЛЕННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК СТАНУ РОТОРНИХ МАШИН ІЗ ПАРАМЕТРІВ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ВІБРАЦІЇ

Воронцов О.Г.

Донецький національний технічний університет

vag@fcita.dn.ua

Comparative analysis of methods for pick out of diagnostics signs is accomplished. Research results allow to reveal some problems of vibrosignals treatment and obtain the potential characteristics of methods.

**Постановка проблеми.** Вирішення проблеми вірогідності вібродіагностики – одна з необхідних умов підвищення ефективності використання роторних машин, котрі складають ядро багатьох електротехнічних комплексів. Для одержання потенційних показників вірогідності діагностування необхідно мати характеристики діагностичних ознак станів об'єкта, які використовуються згідно з обраним методом.

**Аналіз існуючого стану вирішення проблеми** показує, що більшість відомих засобів високочастотної вібродіагностики реалізують обмежену кількість методів виділення діагностичних ознак із параметрів високочастотної вібрації. У перелік вищезгаданих методів виділення ознак повинні бути включені [1]:

- визначення середньої потужності вібрації у заданій смузі частот;
- визначення середньої потужності пульсації високочастотної вібрації роторної машини в інформативній області частот;
- визначення пік-фактора високочастотної вібрації.

**Метою роботи** є порівняльний аналіз методів виділення діагностичних ознак, що дозволяє визначити як проблеми обробки вібросигналів при формуванні діагностичних ознак, так і одержати оцінки їхніх потенціальних можливостей.

**Визначення середньої потужності вібрації у заданій смузі частот** (см. рис.1).

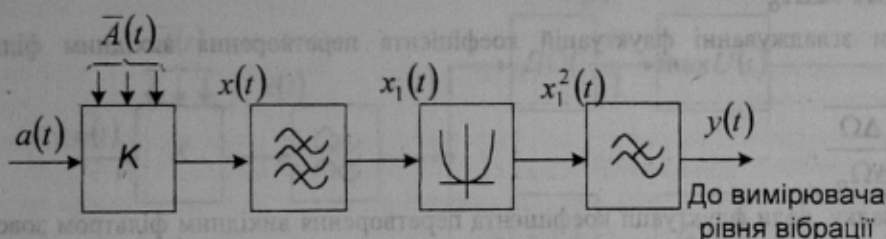


Рис. 1. Структурна схема, що відображає визначення середньої потужності вібрації в заданій смузі частот

перетворення вхідного перетворювача  $K$  може змінюватися випадковим образом. Причиною змін можуть бути впливи на вхідне коло вимірювального каналу (ВК) системи вібродіагностики, позасмугові сигнали значного рівня, завади, температурні впливи на сенсор, тощо.

Мірою відносної зміни коефіцієнта перетворення може бути величина

$$\sigma_K = \left\langle \sqrt{\left( \frac{\Delta K(t)}{K_0} \right)^2} \right\rangle = \left\langle \sqrt{\alpha^2(t)} \right\rangle,$$

де  $K_0$  - номінальне значення коефіцієнта перетворення;

$\Delta K(t)$  - абсолютна величина випадкового відхилення коефіцієнта перетворення.

Кутові дужки означають тут визначення середнього значення.

Частотний діапазон флуктуацій коефіцієнта перетворення характеризується ефективною смугою частот

$$\Delta\Omega_\alpha = \frac{\pi}{2\tau_\alpha},$$

де  $\tau_\alpha$  - інтервал кореляції флуктуації коефіцієнта перетворення.

Селективні властивості фільтрів характеризуються смугою прозорості для смугового фільтра  $\Delta\omega$  й частотою зрізу  $\Omega$  - низькочастотного. Вихідний сигнал схеми  $y(t)$  - випадковий процес, що характеризується математичним очікуванням  $M_y$ , який, із точністю до постійного коефіцієнта, є оцінкою середньої потужності

Процедура визначення середньої потужності вібрації як стаціонарного випадкового процесу включає: нормалізацію вібросигналу, виділення інформативної смуги частот, зведення у квадрат і подальшу низькочастотну фільтрацію [2]. Під дією зовнішніх факторів  $\bar{A}(t)$  коефіцієнт

процесу на його вході. Середньоквадратичне значення (СКЗ) флуктуацій  $\sigma_y$  є мірою невизначеності вимірювання середньої потужності. Флуктуації вхідного сигналу обумовлені випадковим характером сигналу на вході, який містить окрім інформативної складової, випадкові завади, що попадають у смугу прозорості фільтра  $a_0(t)$  і власні шуми вхідного перетворювача  $b(t)$ . Приріст вхідного сигналу  $\Delta a(t)$ , обумовлений дефектом, також процес випадковий. Усі названі компоненти характеризуються спектральними густинами потужностей (СПП), які у межах смуги  $\Delta\omega$  будемо вважати постійними та рівними  $S_{a0}$ ,  $S_b$  і  $S_{\Delta a}$ .

Якість роботи схеми, а саме її здатність реагувати на мінімальні зміни приросту інформативної складової (тобто чутливість) може бути охарактеризовано мінімальною зміною  $S_{\Delta a} = S_{\Delta am}$ , при якій середнє значення процесу  $y(t)$   $M_y$  змінюється на величину, рівну  $2\sigma_y$ , що відповідає ймовірності ухвалення правильного рішення 0,95, коли флуктуації оцінки потужності описуються нормальним законом.

У рамках вищевказаних припущень і обмежень, згідно з [3], маємо вираження для чутливості схеми рис. 1

$$S_{\Delta am} = 2\sqrt{2}(S_b + S_{a0}) \sqrt{\frac{\Delta\Omega}{\Delta\omega} \left( 1 + 2\sigma_K^2 \frac{\Delta\omega}{\Delta\Omega + \Delta\Omega_\alpha} \right)},$$

де  $\Delta\Omega_\alpha$  - ефективна смуга спектра флуктуації.

З наведеного вираження впливає декілька часткових випадків:

1. Чутливість схеми при відсутності флуктуацій коефіцієнта перетворення [ $\alpha(t) \equiv 0$ ]

$$S_{\Delta am} = 2\sqrt{2}(S_b + S_{a0}) \sqrt{\frac{\Delta\Omega}{\Delta\omega}}$$

2. Чутливість схеми при наявності флуктуації коефіцієнта перетворення вхідного перетворювача [ $\alpha(t) \neq 0$ ] й оцінюванні потужності вібрацій у широкій смузі частот ( $\Delta\omega \rightarrow \infty$ )

$$S_{\Delta am} = 4\sigma_\alpha (S_b + S_{a0}) \sqrt{\frac{\Delta\Omega}{\Delta\Omega + \Delta\Omega_\alpha}}$$

3. Чутливість схеми при згладжуванні флуктуацій коефіцієнта перетворення вихідним фільтром ( $\Delta\Omega_\alpha \gg \Delta\Omega$ )

$$S_{\Delta am} = 4\sigma_\alpha (S_b + S_{a0}) \sqrt{\frac{\Delta\Omega}{\Delta\Omega_\alpha}} \quad (1)$$

4. Чутливість схеми у випадку, коли флуктуації коефіцієнта перетворення вихідним фільтром зовсім не згладжується ( $\Delta\Omega_\alpha \ll \Delta\Omega$ )

$$S_{\Delta am} = 4(S_b + S_{a0})\sigma_\alpha.$$

Наведені результати дають можливість обґрунтувати параметри елементів схеми визначення потужності вібрації і, зокрема, фільтрів, виходячи з вимог досягнення необхідної чутливості й вірогідності, а так само оцінити можливість фізичної реалізації схеми.

**Визначення середньої потужності пульсацій СПП високочастотної вібрації роторної машини в інформативній області частот (см. рис. 2).**

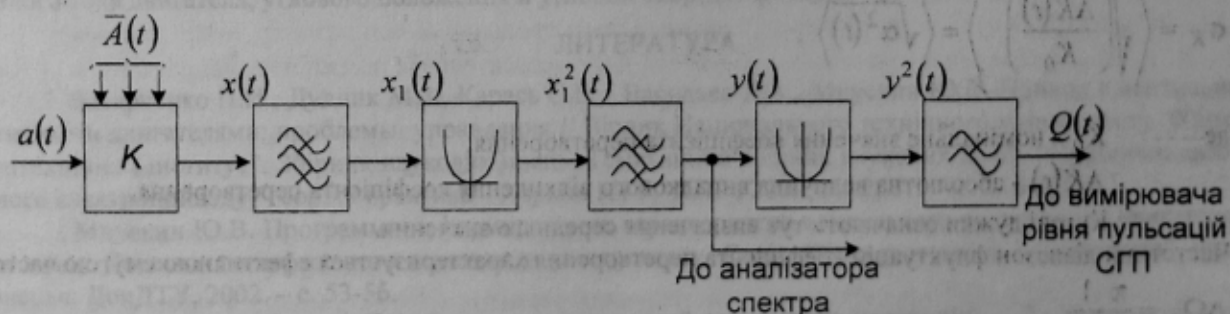


Рис. 2. Структурна схема, що відображає визначення середньої потужності пульсацій СПП вібрації

У загальному випадку вхідний сигнал  $a(t)$  містить два компоненти - стаціонарну випадкову складову завади  $a_0(t)$  й пульсації, амплітудою  $\Delta a(t)$ . Враховуються також власні шуми вхідного перетворювача  $b(t)$ .

Усім цим компонентам відповідають СГП -  $S_a$ ,  $S_{b0}$  і  $\Delta S_a$ . Вихідний сигнал схеми – випадковий процес зміни потужності  $Q(t)$  з математичним очікуванням  $M_Q$ , що є оцінкою середньої потужності пульсацій СГП сигналу на вході схеми. СКЗ флуктуацій сигналу на її виході,  $\sigma_Q$  - є мірою невизначеності виміру пульсацій.

Чутливість даної схеми визначається як мінімальне збільшення СГП пульсації  $S_{\Delta a} = S_{\Delta am}$ , при якому  $M_Q$  змінюється на величину  $2\sigma_Q$ . На основі підходу, запропонованому у [4] зроблено аналіз показника чутливості розглянутої схеми. Встановлено, що чутливість істотно залежить від рівня пульсацій СГП на вході. Збільшення рівня пульсацій суттєво підвищує чутливість. Найкращу чутливість, величина якої визначається вираженням

$$\Delta S_{am} = 2\pi(S_b + S_{a0}) \sqrt{\frac{1}{\Delta\Omega} \cdot \frac{\Delta\Omega_1 \Delta\Omega_2}{\Delta\Omega_1 + \Delta\Omega_2}} \times \sqrt{1 + \frac{\Delta S_a}{S_b + S_{a0}} + \frac{1}{2} \frac{\Delta S_a}{(S_b + S_{a0})^2} \left(1 + \frac{8\sigma_a^2}{\pi^2} \frac{\Delta\omega}{\Delta\Omega_\alpha}\right)} \quad (2)$$

розглянута схема має, коли виконуються умови

$$\left(\frac{\Delta S_a}{S_b + S_{a0}}\right)^2 \frac{\Delta\omega}{\pi^2 \Delta\Omega_1} \gg 1, \quad \Delta\Omega_\alpha \gg \Delta\Omega_1, \Delta\Omega.$$

Аналіз результатів показує, що через використання асинхронного квадратичного детектора потенційні можливості розглянутого методу для рішення задач ранньої діагностики недовикористовуються. Крім того, як випливає з вираження (2), вплив флуктуацій коефіцієнта перетворення вхідного перетворювача на показник чутливості неможливо усунути подальшою фільтрацією і всі сформульовані раніше висновки, щодо вимог до вхідного перетворювача залишаються справедливими й тут.

**Визначення пік-фактора високочастотної вібрації (см. рис.3).**

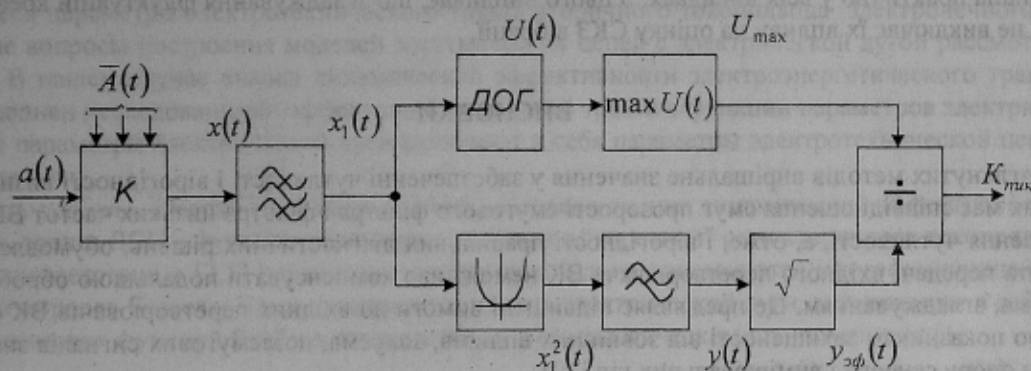


Рис. 3. Структурна схема визначення пік-фактора високочастотної вібрації

Схема містить крім засобів обчислення ефективного значення вібрації в інформативній смузі частот, так само засоби визначення амплітуди обвідної вібрації й відносини цих величин.

Рівень сигналу обвідної для стаціонарного процесу є незмінний, отже середнє й ефективне значення обвідної збігаються. З урахуванням цього ефективне значення обвідної можна визначити за формулою [5]

$$Y_{эф} = \sigma_{x1} \sqrt{\frac{\pi}{2}}$$

де - СКЗ вібросигналу  $\sigma_{x1} = k \sqrt{\int_{\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}} |K_1(\omega)|^2 |S_a(\omega)|^2 d\omega}$  на вході смугового фільтра;

$\omega_0$  - центральна частота смуги фільтрації  $\Delta\omega$ .

Визначення оцінки амплітуди вібрації, що збуджується ударними імпульсами можна розглядати як визначення амплітуди обвідної сигналу  $x_1(t)$  на виході смугового фільтра. Якщо тривалість перехідної функції системи "опора - смуговий фільтр"  $h_n(t)$ ,  $t_c$ , значно менше, ніж період дії імпульсного збурювання

$$t_n \ll T_b = \frac{2\pi}{\omega_b},$$

де  $\omega_b$  - частота дії збурювань, і амплітуда ударного збурювання  $P_0$  порівнянна чи менша із СКЗ за-  
 вад, то впливом імпульсів на ефективне значення вібрації можна зневажити. Останнє характерно для діагностики  
 дефектів, що зароджуються. З урахуванням вищевикладеного, значення діагностичної ознаки  $K_{пик}$  дорів-  
 нює

$$K_{пик} = \frac{P_0 \max h_n(t)}{\sigma_a} \quad (3)$$

де  $\sigma_a = \frac{\sigma_{x1}}{K}$  - СКЗ сигналу  $a(t)$  в смузі прозорості смугового фільтра.

В отримане вираження (3) не входить коефіцієнт перетворення вхідного перетворювача, відкілья пови-  
 нно було б впливати, що на розглянуту діагностичну ознаку флуктуації коефіцієнта перетворення не вплива-  
 ють. Це, однак, не зовсім так, оскільки співвідношення (3) не враховує різні умови згладжування флуктуації  
 при визначенні пікового значення обвідної вібрації й ефективного значення цієї вібрації. Різниця складається,  
 насамперед у тім, що при урахуванні впливу флуктуацій на амплітуду обвідної варто брати до уваги співвідно-  
 шення тривалості інтервалу кореляції флуктуацій коефіцієнта перетворення

$$\tau_\alpha = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\Delta\Omega_\alpha}$$

і тривалості імпульсної перехідної функції фільтруючої системи  $t_n$ . Умова згладжування флуктуацій при ви-  
 значенні амплітуди обвідної  $\tau_\alpha \ll t_n$  тут практично не має фізичних основ, тому в реальності не виконується.  
 Звідси йде, що збільшення коефіцієнта перетворення прямо позначається на рівні обвідної, а, отже, і на її мак-  
 симальному значенні. З іншого боку, умова згладжування пульсацій при визначенні ефективного значення віб-  
 рації

$$\Delta\Omega_\alpha \gg \Delta\Omega$$

може бути виконана практично у всіх випадках. З цього випливає, що згладжування флуктуацій коефіцієнта  $K$   
 тут є, але воно, не виключає їх впливу на оцінку СКЗ вібрації.

## ВИСНОВКИ

1. Для розглянутих методів вирішальне значення у забезпеченні чутливості і вірогідності визначення діа-  
 гностичних ознак має співвідношення смуг прозорості смугового фільтра і фільтра низьких частот ВК.

1. Погіршення чутливості, а, отже, і вірогідності правильних діагностичних рішень, обумовлене флукту-  
 ацією коефіцієнта передачі вхідного перетворювача ВК неможливо компенсувати подальшою обробкою вібро-  
 сигналу і, зокрема, згладжуванням. Це пред'являє підвищені вимоги до вхідних перетворювачів ВК систем віб-  
 родіагностики по показникам захищеності від зовнішніх впливів, зокрема, позасмугових сигналів значного рів-  
 ня, впливу зміни опору сенсора і вимірювальних кіл і т.д.

2. Через використання асинхронного квадратичного детектора потенційні можливості методів, які засно-  
 вані на визначенні середньої потужності пульсації високочастотної вібрації роторної машини в інформативній  
 області частот, недовикористовуються. Крім того, вплив флуктуацій коефіцієнта перетворення вхідного пере-  
 творювача на показник чутливості неможливо усунути подальшою фільтрацією і ця обставина визначає високі  
 вимоги щодо стабільності вхідного перетворювача ВК.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соколова А.Г. Методы и средства виброакустической диагностики машин // Проблемы машиностроения и  
 надежности машин. - 1998. - №5. - С. 156-163.
2. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. - М.: Мир, 1974. - 464 с.
3. Бункин Ф.В., Карлов Н.В. К вопросу о чувствительности радиометров (I) // Журнал технической физики. -  
 1955. - Т. XXV, №. 3. - С. 430-435.
4. Бункин Ф.В., Карлов Н.В. К вопросу о чувствительности радиометров (II) // Журнал технической физики. -  
 1955. - Т. XXV, №. 4. - С. 733-741.
5. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. - М.: Советское радио, 1966. - 678 с.

Рекомендовано до друку д.т.н. проф.. Сивокобиленко В.Ф.