

**ОЦЕНИВАНИЕ ВОЗМУЩАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ,  
ВЫЗВАННОГО ДЕФЕКТОМ РОТОРНОЙ МАШИНЫ,  
ПО КОМПЛЕКСНЫМ ДИАГНОСТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ**

**Воронцов А.Г.**

Донецкий национальный технический университет,  
кафедра автоматики и телекоммуникаций  
E-mail: [vag@fcita.dn.ua](mailto:vag@fcita.dn.ua)

**Abstract**

*Vorontsov A.G. Estimating of disturbing action causing by rotor machine defect with complex diagnostic parameters. Parameters of observed periodical-transitional vibroprocess - average power into informative frequency band and median vibration frequency into that band are used as elementary diagnostic parameters of rotary machine. Unification of that one and getting the integral scalar diagnostic parameter which has bigger increment than elementary diagnostic parameters are the base conception and result of the report.*

**Постановка проблемы.** Расширение области применения методов высокочастотной вибродиагностики на тихоходные роторные машины определяет актуальность проблемы достоверности виброметрической информации, так как снижение оборотной частоты ротора существенно ухудшает соотношение сигнал-шум в измерительном канале диагностической системы. Наиболее полные сведения о дефектах роторной машины в процессе ее эксплуатации могут быть получены при комплексном анализе вибрации опоры, как периодически нестационарного случайного процесса [1].

**Анализ существующего состояния решения проблемы** показывает, что к настоящему времени предложены методы диагностирования, основанные на комплексном анализе параметров вибрации в частотной и временной области одновременно [2,3] с использованием частотно-временных распределений (ЧВР) [4]. Ограничением известных методов является сложность их использования для расширения набора диагностируемых состояний. Задача существенно упрощается, если установлен закон изменения силового воздействия на опору, вызванного дефектом.

**Целью работы** является разработка концепции восстановления закона изменения силового воздействия на опору, вызванного дефектом, на основе совместного анализа частотных и временных диагностических параметров.

**Изложение основного материала исследования.** ЧВР  $p(t, f)$  несет в себе информацию о законе изменения интенсивности вибрации  $s(t)$  во времени, где под интенсивностью понимается энергия вибрации, приходящаяся на единицу частоты  $f$  и времени  $t$  одновременно. В [5] предложена модель опоры качения как формирователя вибропроцесса в виде соединения генератора широкополосного шума и фильтрующего звена, параметры которых зависят от силового воздействия на опору. Модель отображает процесс амплитудной и частотной модуляции высокочастотной вибрации, возбуждаемой в контактах качения подшипника опоры. С физической точки зрения, влияние изменяющейся нагрузки на ЧВР сводится к изменению мощности вибрации опоры в рассматриваемый момент времени и перераспределению этой мощности между частотными компонентами мгновенного спектра. Этот процесс можно представить как деформацию сечения ЧВР частотной плоскостью  $t = t_j$  (здесь  $t_j$  - момент

времени соответствующий  $j$ -у сечению,  $j = 0, 1, 2, 3, \dots, J$ ) под действием изменяющейся во времени силовой нагрузки (см. рис. 1).

Если ЧВР удовлетворяет условиям маргинальности [4], интегральными параметрами, характеризующими изменяющуюся форму сечения, могут служить результирующая мощность спектральных компонент информативной полосы частот в рассматриваемый момент времени  $t$

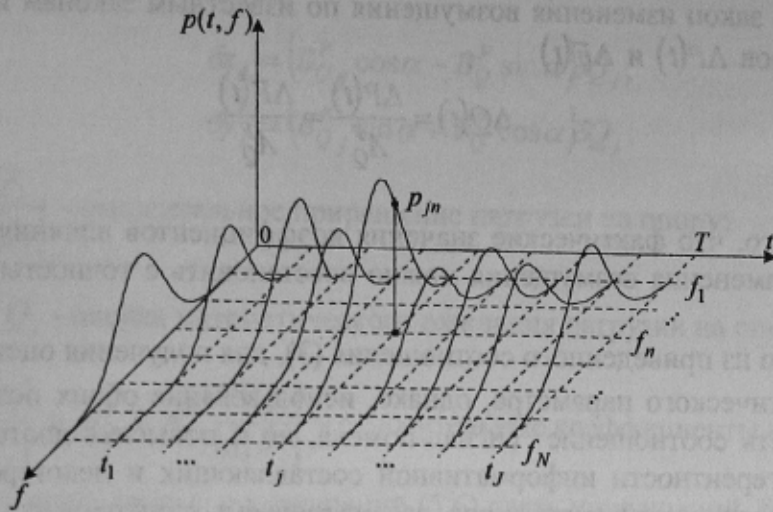


Рис. 1- Сегмент ЧВР, определенный на периоде возмущающей силы

$$P(t) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} p(t, f) df, \tag{1}$$

где  $f_{\min} = f_1$  и  $f_{\max} = f_N$  - нижняя и верхняя граница информативной полосы частот (см. рис.1) и средневзвешенное значение частоты мгновенного спектра мощности в той же полосе

$$F(t) = \frac{1}{P(t)} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} p(t, f) f df. \tag{2}$$

Указанные интегральные параметры в общем случае нелинейным образом зависят от изменяющейся во времени нагрузки на опору  $Q(t)$ . Если для текущего момента  $t = \theta$  нагрузка равна  $Q(t = \theta) = Q_\theta$ , имеем

$$P[Q(t = \theta)] = P(Q_\theta), \quad F[Q(t = \theta)] = F(Q_\theta).$$

При зарождении дефектов и на начальных стадиях их развития, приращения силовой нагрузки  $\Delta Q_\theta$ , вызванные ими, малы в сравнении со статической нагрузкой. Это позволяет линеаризовать указанные зависимости и на этом основании записать следующие соотношения для приращений

$$\Delta P_\theta = \frac{\partial}{\partial Q_\theta} P(Q_\theta) \Delta Q_\theta, \quad \Delta F_\theta = \frac{\partial}{\partial Q_\theta} F(Q_\theta) \Delta Q_\theta,$$

где  $\Delta P_\theta$  и  $\Delta F_\theta$  приращение мощности вибрации в информативной полосе и средневзвешенной частоты под действием возмущения  $\Delta Q_\theta$ .

Независимость коэффициентов влияния

$$A_Q^P = \frac{\partial}{\partial Q_t} P(Q_t) = \frac{\partial}{\partial Q} P(Q) \quad \text{и} \quad A_Q^F = \frac{\partial}{\partial Q_t} F(Q_t) = \frac{\partial}{\partial Q} F(Q)$$

от значения действующей нагрузки (в рамках линеаризованной модели) позволяет восстанавливать закон изменения возмущения по известным законам изменения диагностических параметров  $\Delta P(t)$  и  $\Delta F(t)$

$$\Delta Q(t) = \frac{\Delta P(t)}{A_Q^P} = \frac{\Delta F(t)}{A_Q^F} \tag{3}$$

Ввиду того, что фактические значения коэффициентов влияния, как правило, неизвестны, закон изменения возмущения можно восстановить с точностью до постоянного коэффициента.

Как видно из приведенного соотношения (3), для получения оценки  $\Delta Q(t)$  достаточно одного диагностического параметра, однако, использование обоих позволяет не только несколько улучшить соотношение сигнал-помеха, но и повысить достоверность за счет использования когерентности информативной составляющих и некогерентности шумовых в каждом из диагностических параметров, рассматриваемых как процессы.

Периодически нестационарный характер вибрации опоры и положительная определенность ЧВР позволяет усреднять когерентные отрезки ЧВР на интервалах кратных периоду действия нагрузки  $Q(t) = Q(t + nT)$  и получать усредненные ЧВР [3]. Сечения усредненного ЧВР плоскостью  $t = t_j$  позволяют вычислить оценки диагностических параметров (1,2) для этих сечений  $P_j$  и  $F_j$ . Упорядоченные массивы значений  $\{P_j\}$  и  $\{F_j\}$  представляют собой дискретизированные зависимости изменения оценок параметров  $P(t)$ ,  $F(t)$  во времени. Для восстановления закона изменения параметров  $P(t)$ ,  $F(t)$  по дискретизированным реализациям необходимо выполнение требований теоремы отсчетов применительно к сигналу с ограниченной полосой [6].

Величины  $P(t)$ ,  $F(t)$  можно рассматривать как координаты вектора, представляющего комплексный диагностический параметр  $V(t)$ . За период вращения ротора конец вектора в общем случае описывает замкнутую кривую на плоскости  $P$ - $F$ . Если процессы  $P(t)$ ,  $F(t)$  когерентны, что как правило выполняется для тихоходных роторных машин, то криволинейная траектория вырождается в прямую линию. Геометрический центр фигуры, очерченной траекторией конца вектора, соответствует началу системы координат, относительно которого отсчитываются приращения  $\Delta P(t)$  и  $\Delta F(t)$ . Действующие помехи размывают траекторию конца вектора  $V(t)$  и вместо детерминированной кривой имеет место случайная ее оценка. В результате рассмотренной ранее дискретизации оценка представляется полем рассеяния точек с координатами  $\{P_j, F_j\}$ . Если идеализированная траектория представлена прямой, упомянутое поле точек будет группироваться в ее окрестности и иметь соответствующую форму.

Оценка координат центра поля рассеяния может быть найдена как оценка математического ожидания координат точек поля рассеяния

$$M[P_j] = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J P_j, \quad M[F_j] = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J F_j \tag{4}$$

С учетом равенств (4), оценки приращения простых диагностических параметров могут быть найдены из соотношений:

$$\Delta P_j = P_j - M[P_j], \quad \Delta F_j = F_j - M[F_j].$$

Если произвести нормировку приращений и преобразование координат путем переноса их начала в центр поля рассеяния и поворота осей, то приращения новых координат  $\delta x$  и  $\delta y$  будут связаны с относительным изменением нагрузки на опору зависимостями вида:

$$\delta x_j = (B_Q^P \cos \alpha - B_Q^F \sin \alpha) \delta Q_j, \tag{5}$$

$$\delta y_j = (B_Q^P \sin \alpha + B_Q^F \cos \alpha) \delta Q_j. \tag{6}$$

где  $\delta Q_j = \frac{\Delta Q_j}{M[Q_j]}$  - относительное приращение нагрузки на опору;

$M[Q_j] = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J Q_j$  - оценка математического ожидания нагрузки на опору;

$B_Q^P = A_Q^P \frac{M[Q_j]}{M[P_j]}$  и  $B_Q^F = A_Q^F \frac{M[Q_j]}{M[F_j]}$  - относительные коэффициенты влияния.

Как следует из приведенных соотношений (5,6) связь приращений  $\delta x_j$  и  $\delta y_j$  с приращением  $\delta Q_j$  в новых координатах остается линейной. За счет выбора угла поворота осей  $\alpha$  можно обеспечить максимальное (или нулевое) значение приращения  $\delta x_j$  и  $\delta y_j$ . Значение этого угла определяется коэффициентами влияния  $B_Q^P$  и  $B_Q^F$ . При  $B_Q^P = B_Q^F$ , вышеуказанное условие выполняется, когда  $\alpha = \frac{\pi}{4}$ .

Для синтеза параметра, характеризующегося максимальным относительным приращением воспользуемся поворотом осей координат на такой угол, при котором аппроксимирующая прямая, построенная на статистике поля рассеяния, совпадет с одной из координатных осей. Значение углового коэффициента для аппроксимирующей прямой

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_Q^P}{B_Q^F} = B_F^P$$

может быть получено методом наименьших квадратов [7] из условия

$$\sum_{j=1}^J (B_F^P \delta P_j - \delta F_j)^2 \rightarrow \min, \tag{7}$$

где  $\delta P_j = \frac{\Delta P_j}{M[P_j]}$ ,  $\delta F_j = \frac{\Delta F_j}{M[F_j]}$  - относительные приращения простых диагностических параметров  $P_j$  и  $F_j$ .

Для получения оценочной зависимости нагрузки на опору от времени необходимо использовать то из уравнений (5 или 6), которое соответствует координате оси совмещаемой с аппроксимирующей прямой. Искомая оценка получается путем приведения в соответствие момента времени  $t_j$ , соответствующего  $j$ -у сечению и значения  $\delta x_j$  или  $\delta y_j$ . Получаемая при этом зависимость носит скорее качественный характер, хотя и реализует количественные возможности статистик по обоим простым диагностическим параметрам. Для получения количественной оценки необходимо определить коэффициенты влияния, для чего могут быть использованы уравнения (5,6), объединяемые в систему. Если угол поворота осей вы-

бран из условия (7), левая часть одного из уравнений становится равной нулю. Для второго же она приобретает максимальное значению. Так, при  $\delta x_j = 0$  и  $\delta y_j = \delta y_{\max}$ , имеем систему

$$B_{Q_j}^P \cos \alpha - B_{Q_j}^F \sin \alpha = 0, \quad (8)$$

$$(B_{Q_j}^P \sin \alpha + B_{Q_j}^F \cos \alpha) \delta Q_{\max} = \delta y_{\max}, \quad (9)$$

где  $\delta Q_{\max}$  - относительное значение максимальной нагрузки на опору.

Величины, необходимые для нахождения коэффициентов влияния из соотношений (5,6) могут быть получены на основе экспериментальных данных. Для этого производится калиброванная разбалансировка ротора, позволяющая определить  $\delta Q_{\max}$  расчетным путем, и собирается необходимая статистика по параметрам  $P_j$  и  $F_j$  при воздействии на опору известного возмущения. Полученные в этих условиях значения коэффициентов влияния могут быть использованы для количественного оценивания нагрузки на опору при исследовании реальных дефектов элементов.

### Заключение

Циклическое изменение нагрузки на опору ротора, вызванное дефектом, приводит к изменению условий протекания многочисленных физических явления, связанных с формированием и преобразованием высокочастотной вибрации. Совместное изменение интенсивности вибрации во временной и частотной областях – наиболее явные следствия этого. Параметры наблюдаемого периодически нестационарного вибропроцесса – средняя мощность вибрации в информативной полосе частот и медианное значение частоты вибрации в этой же полосе рассматриваемые как функции времени могут быть использованы в качестве простых диагностических параметров дефектов роторной машины. Объединение этих параметров в комплексный и получение на этой основе интегрального скалярного диагностического показателя, характеризующегося большим относительным приращением, чем используемые для его построения простые диагностические параметры, составляют основу предлагаемой в работе концепции восстановления закона изменения силового воздействия на опору, вызванного дефектом.

### Литература

1. Воронцов О.Г. Інформаційно-вимірювальні системи високочастотної вібродіагностики роторних машин: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.16 / Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2003. – 34 с.
2. Воронцов А.Г. Метод повышения достоверности вибродиагностики роторных машин по комплексу диагностических параметров // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. - Донецьк: РВА ДонДТУ. - 2002. - Вип. 41. - С. 212–215.
3. Воронцов О.Г., Дегтяренко І.В. Розробка методу віброакустичної діагностики тихохідних роторних машин // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк: РВА ДонДТУ. - 2002. - Вип. 38. - С. 250 - 256.
4. Коэн Л. Время-частотные распределения: Обзор // ТИИЭР. – 1989. – Т.77, №10. – С. 72–120.
5. Воронцов А.Г. Элементы теории высокочастотной вибродиагностики роторных машин. Монография. – Донецьк: РВА ДонНТУ, 2002. – 137 с.
6. Джерри А. Теорема отсчетов Шеннона, ее различные обобщения и приложения. Обзор. ТИИЭР, т. 65, №11, 1977г., С53-87.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.