

СТАТЬИ

УДК 621.039.56

НЕЙТРОННО-ШУМОВАЯ ВИБРОДИАГНОСТИКА ШАХТЫ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР-440

Аркадов Г.В. (ВНИИАЭС), Павелко В.И. (РНЦ «Курчатовский ин-т»),
Титов С.И. (Кольская АЭС)

Наряду с традиционными параметрами вибродиагностики, такими, как амплитуда и частота резонанса, в качестве диагностического признака используется траектория движения какого-либо элемента оборудования реакторной установки при ее вибрации. Обычно траектории оценивают по фазовым соотношениям сигналов нескольких датчиков. Этот способ называется модальным анализом. Оценка фазы характеризует некоторый временной интервал $(0, T)$, на котором она получена, т.е. в результате модального анализа получаются некоторые усредненные, а не текущие (мгновенные) траектории, поэтому малые изменения траектории модальный анализ может не выявить, так как вклад в изменение оценок углов будет незначительным.

Для ранней диагностики ценней получить траекторию как функцию времени. Причем если исходные реализации вибросигналов на временном интервале $(0, T)$ состояли из N точек, то и функции, характеризующие траекторию, также должны быть оценены на том же временном интервале и с тем числом точек.

Метод оценки траектории движения шахты активной зоны. Известно [1], что флуктуации тока ионизационной камеры $\delta i(t)$, нормированные на средний ток $i(t)$, пропорциональны флуктуациям толщины водяного зазора в опускном участке между шахтой и корпусом реактора $\delta x(t)$:

$$\delta i/i = -\text{const} \delta x. \quad (1)$$

Известна и константа пропорциональности: для ВВЭР $\text{const} = 0,15 \text{ см}^{-1}$. Таким образом, простейшая модель (1) дает возможность оценивать абсолютное перемещение шахты реактора с помощью косвенных измерений.

Метод восстановления траектории движения шахты по внезонным нейтронным шумам имеет следующую постановку. Пусть в произвольный момент времени шахта отклонилась от вертикального равновесного положения на Δx в направлении угла Θ (рис. 1). Пусть для определенности имеются три ионизационные камеры (i_1, i_2, i_3) с произвольными углами между собой $\angle i_1 i_2 = \alpha$, $\angle i_1 i_3 = \beta$, которые отсчитываются от луча Oi_1 . Изменение тока первой ионизационной камеры пропорционально l_1 , второй — l_2 , третьей — l_3 . По определению неотрицательная величина Δx представляет собой максимальное отклонение шахты по всевозможным направлениям Θ : $\Delta x = \max l(\Theta)$. Очевидно, что траектория движения шахты описывается двумя функциями времени $\Delta x(t)$, $\Theta(t)$, которые по своей сути являются по-

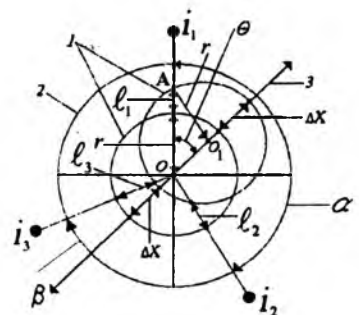


Рис. 1. Параметры, характеризующие отклонение шахты от равновесного вертикального положения: 1 — шахта в равновесном и отклоненном состояниях; 2 — корпус реактора; 3 — направление перемещения шахты

лярными координатами. Таким образом, задача состоит в том, чтобы найти функции $\Delta x(t)$, $\Theta(t)$ по измеренным процессам $l_1(t)$, $l_2(t)$, $l_3(t)$ (точнее, по измеренным флуктуациям токов ионизационных камер, которые пропорциональны соответствующим отклонениям).

Для первой ионизационной камеры из треугольника OO_1A (см. рис. 1) по теореме косинусов находим искомую взаимосвязь между Δx , Θ и l_1 :

$$r^2 = (\Delta x)^2 + (r + l_1)^2 - 2\Delta x(r + l_1)\cos\Theta, \quad (2)$$

где r — радиус шахты (далее этот параметр исключится из системы уравнений). Аналогичные треугольники несложно построить для второй и третьей ионизационных камер, в результате чего получим взаимосвязи Δx , Θ и l_2 , Δx , Θ и l_3 . Искомые функции $\Delta x(t)$, $\Theta(t)$ являются решением экстремальной задачи по переопределенной системе нелинейных уравнений типа (2). Три ионизационные камеры — минимальное число нейтронных датчиков, необходимое для решения задачи восстановления траектории. При кажущейся простоте постановки задачи конечный алгоритм имеет громоздкий вид вследствие поправок на многозначность обратных тригонометрических функций.

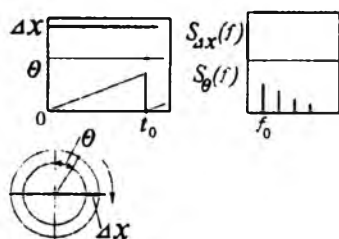


Рис. 2. Характеристики траектории при равномерном круговом вращении шахты

Примеры характерных траекторий движения шахты. На рис. 2. изображена простейшая круговая траектория, характеризующая координатами $\Delta x(t) = \text{const}$ и линейным углом $\Theta(t)$. Так как угол оценивается на интервале $(0-360^\circ)$, то функция $\Theta(t)$ представляет собой периодическую пилообразную кривую, период которой t_0 равен времени полного оборота шахты. Если на каждом цикле колебаний траектория остается неизменной, то спектральная плотность функций $\Delta x(t)$ и $\Theta(t)$, изображенная с правой стороны рис. 2, также однозначно характеризует траекторию, как и исходные временные

функции. Автоспектральная плотность мощности радиуса-вектора Δx представляет собой δ -функцию на нулевой частоте, т.е. самый низкочастотный из возможных спектров. Автоспектральная плотность мощности $\Theta(t)$ состоит из дискретного ряда гармоник n/t_0 , амплитуда которых спадает по закону $1/n$ (n — номер гармоники). На практике точно круговых траекторий не бывает, поэтому нулевая гармоника функции $\Delta x(t)$ (или постоянная составляющая) может приниматься как круговой элемент разложения произвольной сложной траектории.

Любая некруговая траектория характеризуется нелинейной функцией угла, вследствие чего на ней возникают особые точки (точки экстремумов, перегибов, возвратов и т.д.), те, на которых ее последовательные производные обращаются в нуль либо терпят разрыв. Например, если шахта перемещается по эллиптической траектории (рис. 3), то новых экстремумов в функции угла не появляется, кривая по-прежнему монотонна, но появляются точки перегиба. Теперь в автоспектральной

плотности мощности радиуса-вектора помимо нулевой гармоники присутствует δ -функция на двойной оборотной частоте, в автоспектральной плотности мощности угла по сравнению с предыдущим случаем увеличились гармоники на высоких частотах. Несложно сконструировать диагностические признаки на спектральном языке, интегрально характеризующие эллиптическую траекторию.

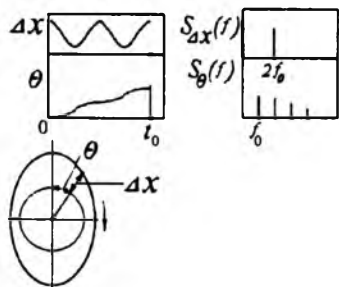


Рис. 3. Характеристики эллиптической траектории

На рис. 4 изображен случай локальной петли. За относительно короткий временной интервал по сравнению с периодом колебаний шахта совершает малый цикл колебаний с возвратом в исходную точку. Понятно, что мелкие временные особенности на спектральном языке описываются высшими гармониками и определить их для любой локальной петли затруднительно. Локальные петли наблюдали при аномальных вибрациях шахты на первом блоке АЭС «Норд» с ВВЭР-440 (Германия) в 1975 г. В работе [2] сделан вывод о том, что локальные петли траектории возникают из-за ударов внутри шпоночных соединений шахта—корпус при значительном износе шпонок. В качестве доказательства приводился экспериментальный факт совпадения угловых координат локальных петель траектории с угловыми координатами шпонок. В качестве признака локальной петли использовали только локальный минимум функции $\Theta(t)$. При ремонтных работах прямыми измерениями геометрических размеров шпонок был подтвержден их внепроектный износ.

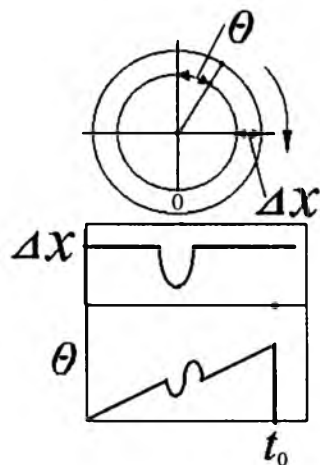
Как следует из рассмотренных примеров, выбор в пользу временного или спектрального описания траектории в каждом конкретном случае решается индивидуально: глобальный вид траектории лучше представлять на спектральном, мелкие особенности траектории (что важно для ранней диагностики) — на временном языке.

В реальности траектория движения шахты не воспроизводится от цикла к циклу и всегда есть побочные шумы, не связанные с вибрациями внутрикорпусных устройств. В частности, в нейтронных шумах есть широкополосный глобальный компонент.

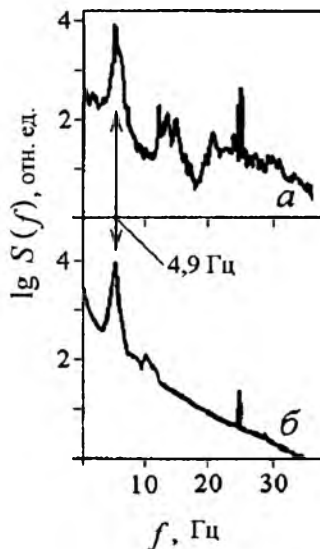
Экспериментальные результаты. На первом блоке Кольской АЭС система виброшумового контроля была расширена тремя внезонными нейтронно-шумовыми каналами (три ионизационными камерами). Сигналы этих камер исследовали совместно с другими сигналами системы (датчики перемещений, пульсаций давления). Было установлено, что доминирующий резонанс в сигналах ионизационных камер и датчиков абсолютных перемещений на частоте 4,9 Гц обусловлен колебаниями шахты совместно с корпусом реактора (рис. 5). Это мощное вибрационное явление значительно превосходит по своей амплитуде все другие источники внезонного нейтронного шума. На этой же частоте и колебания корпуса также превосходят все другие вибрационные эффекты.

Предварительно сигналы трех камер фильтровали с полосой прозрачности шириной 0,2 Гц вокруг центральной частоты колебаний шахты 4,9 Гц, затем оценивали функции траектории. На рис. 6 показаны особые точки (локальные экстремумы, точки перегиба, точки возврата) и, как следствие, смены знака наклона прямолинейных участков, что означает смену направления движения шахты, такие временные участки показаны стрелками. Существенно, что они соответствуют небольшим значениям радиуса-вектора.

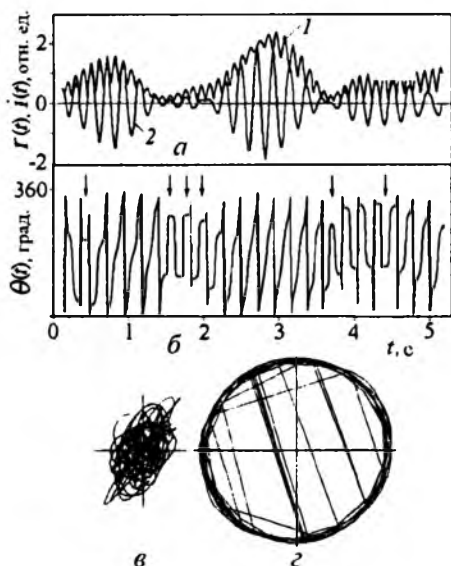
Спектральные характеристики рассматриваемых функций представляют собой гармонические ряды



Р и с. 4. Особенность траектории под названием «локальная петля»



Р и с. 5. Автоспектральная плотность мощности сигнала датчика абсолютного перемещения, установленного на крышке корпуса реактора (а), и ионизационной камеры (б)

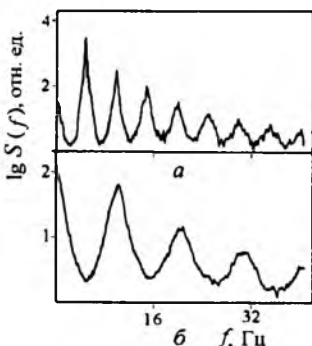


Р и с. 6. Отклонение от равновесного положения (а), угол траектории (б), траектория в полярных координатах $\Delta r(\theta)$ (в), $r + \Delta r(\theta)$ (г): 1 — радиус-вектор траектории; 2 — сигнал ионизационной камеры

ний график на рис. 6). В первом случае дается траектория движения центра шахты вокруг положения равновесия, во втором — траектория движения точки, находящейся на поверхности шахты. Из графика $r + \Delta r(\theta)$ следует, что существуют такие моменты времени, когда шахта переходит с одной точки траектории на другую удаленную точку, нарушая при этом монотонный характер движения. Скачком изменяется угол траектории, возможно, что и с изменением направления движения.

Следующий фрагмент траектории (рис. 8) соответствует максимальному отклонению шахты. Здесь локальных экстремумов нет, траектория имеет ярко выраженный эллиптический характер, причем оси эллипса медленно вращаются вокруг положения равновесия. Поэтому на функции угла траектории можно найти точки перегиба.

В ВВЭР-440 восемь шпонок расположены равномерно по азимуту, т.е. угол между двумя соседними шпонками составляет 45° . Они по-разному изношены и в разных точках траектории по-разному участвуют в закреплении шахты к корпусу реактора. По уже рассмотренным фрагментам траектории видно, что в равновесном положении и при малых отклонениях от него шахта имеет больше степеней свободы, чем в любом другом положении. Это означает, что в данном случае шпоночные соединения не обеспе-



Р и с. 7. Автоспектральная плотность мощности угла траектории (а) и радиуса-вектора (б)

(рис. 7). В спектре радиуса-вектора траектории отсутствует первая и все нечетные гармоники, что соответствует эллиптическому характеру траектории. Кроме того, значительная мощность сосредоточена вблизи нуля Гц, что можно трактовать как мощность круговой составляющей траектории. В спектре угла траектории присутствуют все последовательные гармоники обратной частоты колебаний шахты. По их виду трудно судить о таких аномалиях в поведении угла, как особые точки или перемены наклона кривой. Их лучше исследовать отдельно во временной области.

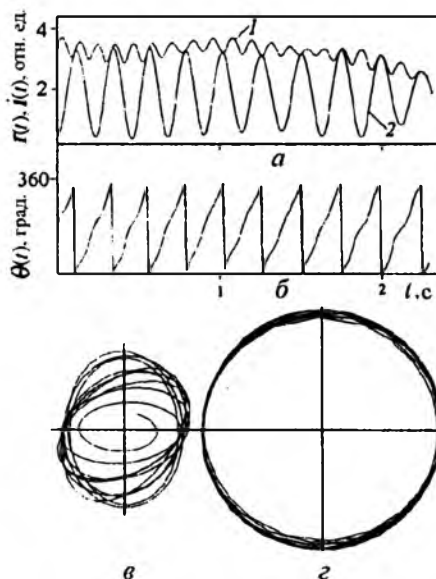
Траектории будем представлять функциями угла и радиуса-вектора в декартовых координатах, в полярных координатах — двумя типами графиков. Первый тип — функция $\Delta r(\theta)$, получаемая в соответствии с рассмотренной моделью (левый нижний график на рис. 6), второй тип — та же функция, но с некоторой постоянной составляющей, имитирующей радиус шахты: $r + \Delta r(\theta)$, $r \gg \Delta r(\theta)$ (правый ниж-

чивают жесткого закрепления шахты с корпусом реактора. И, напротив, при больших амплитудах шахта и корпус колеблются как единое целое.

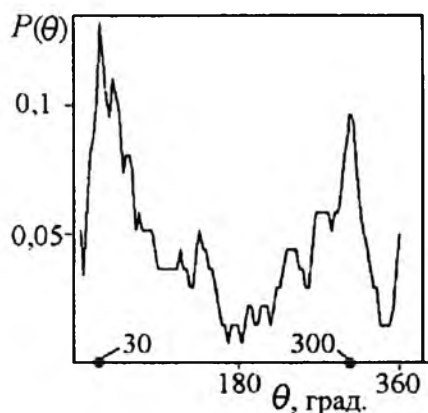
Таким образом, по особым точкам траектории для тех ее участков, которые мало отклоняются от положения равновесия, можно судить о степени изношенности шпонок. Данная идея развивает подход к анализу локальных петель траектории [2]. Отличие состоит в том, что там анализировали значительные аномальные колебания шахты, которые по своему размаху в 10 раз превосходили колебания в нормальных условиях. Локальные петли траектории возникали из-за значительных износов всех шпонок не только в положениях шахты, близких к равновесному, но и в любых других.

Из анализа особых точек следует, что существуют такие углы, на которых траектория чаще всего претерпевает разрыв, более того, существуют преимущественные параллельные направления движения шахты при таком разрыве. Идея диагностирования шпонок состоит в том, что раз какое-то направление чаще других проявляет себя в траектории как особое, значит, в перпендикулярном ему направлении существуют люфты в шпоночных соединениях, обеспечивающие такую степень свободы. Ближайшая к этому направлению пара противоположно расположенных шпонок и попадает под подозрение о максимальной изношенности.

Теперь можно перейти от отдельного анализа особенностей траектории шахты к некоторым статистическим характеристикам. Для этого отметим на графике угла траектории все локальные экстремумы, исключая, конечно, экстремумы, вызванные разрывностью функции при переходе от 360 к 0° . В результате получим массив углов, на которых траектория носит немонотонный характер (в частности, сюда войдут и локальные петли). Построим распределение этих углов (частоту их появления в массиве). Если такое распределение представляет собой постоянную по азимуту функцию (равномерное распределение), то движение шахты в особых точках траектории носит чисто случайный характер. Значит, и изношенность всех шпонок примерно одинакова. Если же в упомянутом распределении существует значимый глобальный максимум, то, отсчитав от этого значения угла угол в 90° , получим направление, на котором пара шпонок обладает максимальным износом. На рис. 9 представлена такая функция распределения. Она обладает двумя ярко выраженными максимумами — при угле 30° и 300° . Заметим, что угловое расстояние между этими максимумами 90° кратно шагу расположения шпонок 45° . Таким образом, получаем два направления ($300^\circ + 90^\circ = 360^\circ + 30^\circ$ и $30^\circ + 90^\circ = 120^\circ$), на которых четыре шпонки обладают максимальными люфтами (напомним, что угол траектории отсчитывается от первой ионизационной камеры по часовой стрелке). Данные направления оказались взаимно перпендикулярными, а это означает, что из восьми шпонок одна половина (через одну) изношена больше, чем другая.



Р и с. 8. Функции, описывающие траекторию при большом отклонении от положения равновесия



Р и с. 9. Частота появления особых точек функции угла траектории

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thie J. Neutron noise sources in PRWs. — Prog. Nucl. Engng, 1977, v. 1, p. 283—286.
2. Grabner A., Grunwald G., Liewers P. e.a. Use of Noise Diagnostics for WWER-440. Годовой отчет Института ядерных исследований, Германия, Розендорф, 1998.