

УДК 621.311.25:621.039

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ОБОРУДОВАНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

© 2014 г. Р.Г. Бабенко, В.Н. Никифоров, О.Ю. Пугачева,
В.И. Сиротина, А.В. Чернов

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл.*

В данной статье рассмотрен подход к диагностированию оборудования с точки зрения теории обнаружения, оценок и модуляции дефектов в виброакустическом сигнале. Приведены результаты экспериментального исследования вероятности обнаружения дефектов подшипников виброакустическим методом. Предложены возможные варианты применения теории обнаружения, оценок и модуляции в диагностических системах.

Ключевые слова: вероятность обнаружения дефектов, виброакустический сигнал, диагностирование оборудования АЭС.

Поступила в редакцию 17.11.2014 г.

Одна из задач диагностирования – выявление неисправностей – может быть тесно связана со статистической задачей обнаружения (рис. 1).



Рис. 1. – Элементы задачи теории обнаружения

Первым элементом является объект исследования или источник, который задает некоторую выходную величину, принимающую одно из M значений $H_0, H_1, H_2, \dots, H_{M-1}$.

Вторым элементом является вероятностный механизм перехода, а третьим – пространство наблюдений. Механизм перехода может быть рассмотрен как блок, который способен различить, какая из гипотез является истинной. Основываясь на этом значении, он формирует некоторую точку в пространстве наблюдений в соответствии с некоторым вероятностным законом.

В задаче диагностики оборудования H_1 может соответствовать наличию неисправности, а H_0 ее отсутствию. Какая именно гипотеза является истинной заранее не известно. Известно, что верна либо гипотеза H_0 , либо гипотеза H_1 .

Проиллюстрируем эти представления примером (рис. 2).

Для решения статистической задачи обнаружения применяют критерии принятия решения. Для каждого критерия возможен один из четырех исходов:

- 1) верна H_0 , выбираем H_0 ;
- 2) верна H_0 , выбираем H_1 ;
- 3) верна H_1 , выбираем H_1 ;
- 4) верна H_1 , выбираем H_0 .

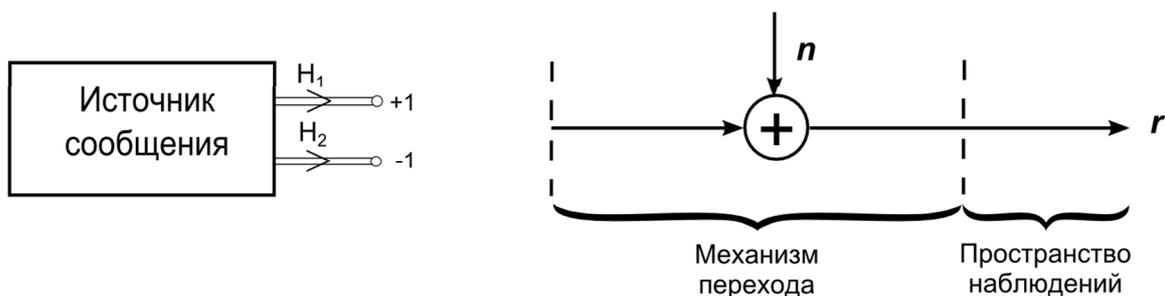


Рис. 2. – Модель принятия решения

Первый и третий исходы соответствуют правильным выборам, а второй и четвертый – ошибочным. Смысл критерия решения состоит в том, что каждому из четырех возможных исходов придается некоторое относительное значение.

Качество обнаружения характеризуется двумя ошибками и, соответственно, двумя вероятностями: ложной тревоги (ошибка первого рода) и пропуска цели (ошибка второго рода) (рис. 3) [2].

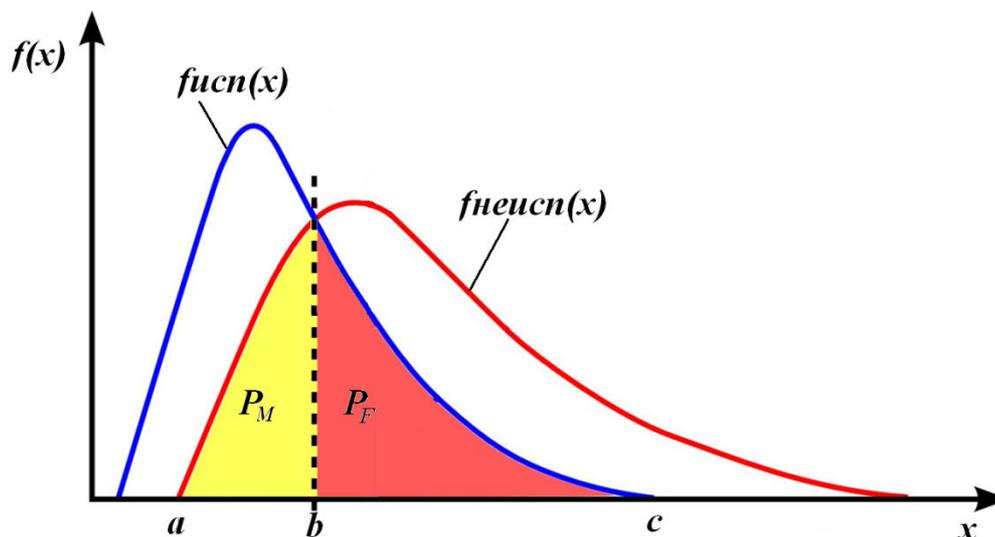


Рис. 3. – Плотности распределения диагностического признака при наличии и отсутствии неисправности

Вероятности пропуска неисправности P_M и ложной тревоги P_F могут быть вычислены, как площади под соответствующими участками кривых:

$$P_M = \int_a^b f_{\text{неисп}}(x) dx,$$

$$P_F = \int_b^c f_{\text{исп}}(x) dx$$

В идеале, диагностический признак должен быть сформирован так, чтобы не пересекались его кривые распределения при наличии и отсутствии неисправностей. Тогда диагностический порог можно выставить так, чтобы соответствующие интегралы под кривыми распределения, характеризующие ошибки обнаружения, были равны нулю (т.е. качество диагностирования было абсолютным). В диагностической практике

эта цель не достигается практически никогда, так как никогда не известны параметры фона для выбранного диагностического признака. Они всегда зависят от места установки датчика и, как правило, нестационарные. Иными словами, левая кривая на рисунке 3 определяется «по месту», после проведения пусконаладочных работ по данной системе диагностики. Правая кривая может быть получена после того, как наберется достаточная статистика по исследуемой неисправности. Для некоторых систем диагностики неисправность моделируется на стендах или проводится ее имитация на объекте [2].

С целью оценки вероятности обнаружения дефектов при диагностике оборудования виброакустическими методами в лаборатории НИИ «Атомного энергетического машиностроения» были проведены экспериментальные исследования неисправностей подшипников качения на стенде входного контроля СВК-А. Стенд состоит из электропривода 1, вращающего вал 3 с испытуемым подшипником 4 через клиноременную передачу 2 со скоростью 2750 об/мин (рис. 4). Подшипник нагружен механизмом радиальной нагрузки 5 на величину 150 Нм. На внешнюю обойму подшипника с помощью магнита и воска установлен датчик виброускорения 6.

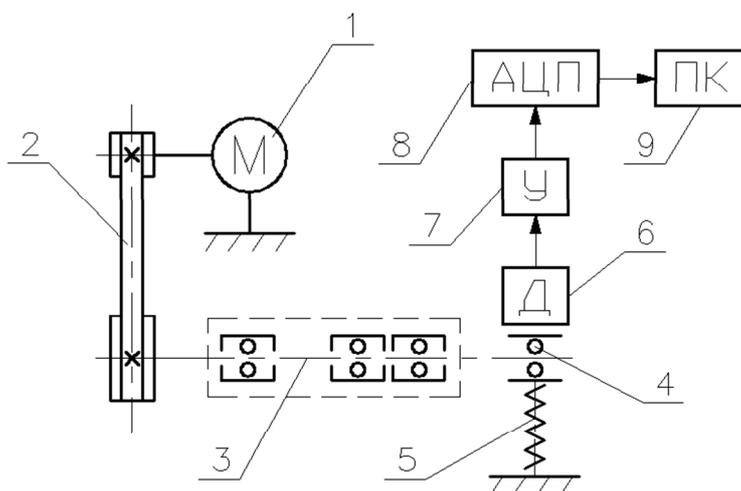


Рис. 4. – Кинематическая схема испытательного стенда:

- 1 – электродвигатель; 2 – ременная передача; 3 – вал на подшипниковых опорах; 4 – испытуемый подшипник; 5 – механизм радиальной нагрузки; 6 – виброакустический датчик; 7 – усилитель; 8 – аналого-цифровой преобразователь; 9 – персональный компьютер

В качестве объектов диагностирования были выбраны подшипники типоразмера 208 (рис. 5) в различном техническом состоянии: новые исправные подшипники со смазкой и без нее; подшипники с дефектами сепаратора, наружного и внутреннего кольца.



Рис. 5. – Объект диагностирования

В процессе эксперимента с помощью измерительного комплекса (поз. 6-9 рис. 4) были зарегистрированы вибрационные сигналы при вращении под нагрузкой исправного и неисправных подшипников.

Основные технические характеристики измерительного комплекса приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Технические характеристики измерительного комплекса

Наименование характеристики	Значение
Диапазон регистрируемых частот	0,5-20000 Гц
Коэффициент чувствительности	40 мВ/мс ²
Частота дискретизации регистрируемых сигналов	до 20000 Гц
Разрядность АЦП измерительной системы	14 бит

Далее полученные вибрационные сигналы подверглись цифровой обработке с целью выделения диагностического параметра (в данном случае огибающей сигнала выделенной с помощью преобразования Гильберта) и построения графиков плотностей распределения вероятностей. Результат обработки сигналов показан на графике (рис. 6).

Из математического анализа известно, что при интегрировании $F(x) = P\{a < x < b\} = \int_a^b f(x)dx$ функции сглаживаются, а при дифференцировании

$f(x) = F'(x)$, их особенности проявляются сильнее. Поэтому функция плотности распределения вероятности $f(x)$ содержит больше информации, чем функция распределения $F(x)$.

Для установленного диагностического порога (пунктирная линия b на графике) рассчитаны вероятности обнаружения и пропуска неисправностей (табл. 2).

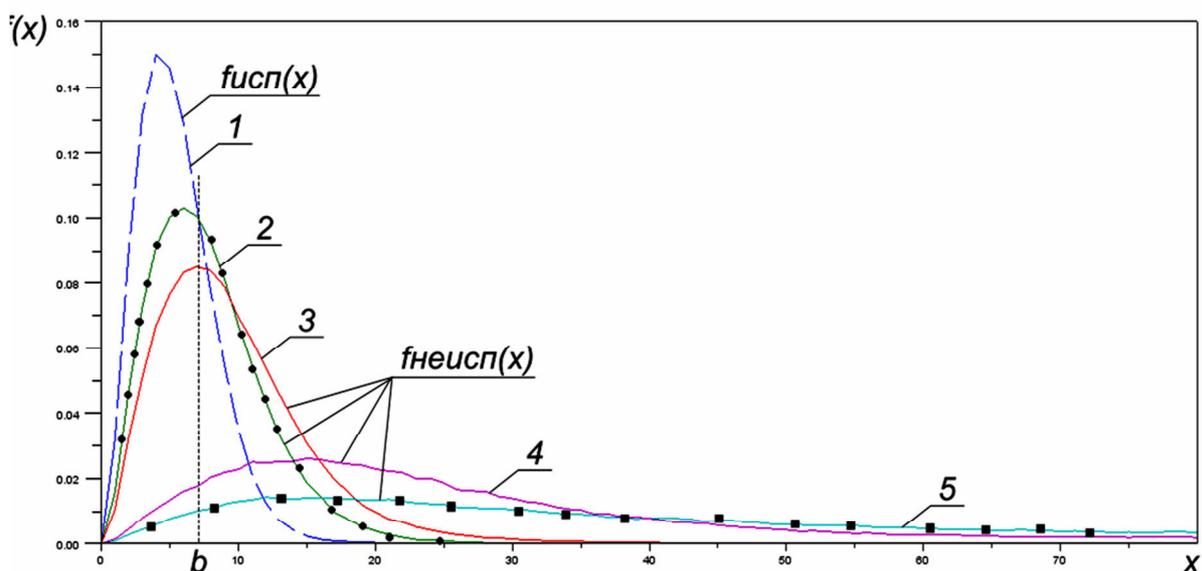


Рис. 6. – Графики плотности распределения огибающих вибрационных сигналов:
1 – исправный подшипник; 2 – подшипник без смазки; 3 – поврежден сепаратор; 4 – раковина на внутреннем кольце; 5 – раковина на внешнем кольце

Таблица 2. – Вероятностные оценки обнаружения неисправности

Неисправность подшипника	Вероятность обнаружения неисправности, %	Вероятность пропуска неисправности, %	Вероятность ложной тревоги, %
Без смазки	50	50	30,5
Поврежден сепаратор	58,3	41,7	30,5
Раковина на внутреннем кольце	86,1	13,9	30,5
Раковина на наружном кольце	88,8	11,2	30,5

В результате проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что применение теории обнаружения и оценок в диагностических системах позволяет:

- Оценить качество и эффективность диагностирования с помощью вероятностного анализа ошибок пропуска неисправности и ложной тревоги.
- Произвести настройку диагностической системы с помощью подбора диагностического признака по критериям минимизации ошибок обнаружения.
- Проанализировать информационное содержание сигнала на выходе измерительной системы. Рассчитать влияние погрешности измерений и шумов на диагностическую систему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Том I. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции. Нью-Йорк, 1968 [Текст] / Г. Трис Ван ; пер. с англ., под ред. проф. В.И. Тихонова. – М.: «Советское радио», 1972. – 744 с.
2. Аркадов, Г.В. и др. Системы диагностирования ВВЭР [Текст] / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, Б.М. Финкель. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 391 с.
3. Абидова Е.А., Чернов А.В. Методы обработки информации в диагностических системах: Учебное пособие. – ВИТИ НИЯУ МИФИ. – Волгодонск, 2013. – 72 с.

Estimating the Probability of Defect Detection In the Equipment Diagnosis by Vibroacoustic Method

**R.G. Babenko, V.N. Nikiforov, O.Yu. Pugacheva, V.I. Sirotina,
A.V. Chernov**

*Volgodonsk Engineering Technical Institute
the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
73/94 Lenin St., Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360
e-mail: nii_energomash@mail.ru*

Abstract – In this article the approach to equipment diagnosis in terms of the theory of detection, evaluation and modulation of defects in vibroacoustic signal is considered. The results of experimental studies of detection probability of bearings defects by vibroacoustic method are given. The possible options of application of the theory of detection, evaluation and modulation in diagnostic systems are offered.

Keywords: probability of defects detection, vibroacoustic signal, diagnosing of the NPP equipment.

REFERENCES

- [1] Van Tris G. Teorija obnaruzhenija, ocenok i moduljacii. Tom I. Teorija obnaruzhenija, ocenok i linejnoj moduljacii. Nju-Jork, 1968 [Theory of detection, estimates and modulation. Volume I. Theory of detection, estimates and linear modulation. New York, 1968]. / G. Tris Van ; per. s angl., pod red. prof. V.I. Tihonova [translated from English, edited by professor V.I. Tikhonov]. M. Pub. «Sovetskoe radio» ["The Soviet radio"], 1972. 744 p. (in Russian)
- [2] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel B.M. Sistemy diagnostirovanija VVJeR [Systems of WWER diagnosing]. M. Pub. Jenergoatomizdat [Energoatomizdat], 2010, ISBN 978-5-98704-496-4, 391 p. (in Russian)
- [3] Abidova E.A., Chernov A.V. Metody obrabotki informacii v diagnosticheskikh sistemah: Uchebnoe posobie [Information processing methods in diagnostic systems: Manual]. Volgodonsk. Pub. VITI NIJaU MIFI [VETI NRNU MEPhI] 2013. 72 p. (in Russian)