

УДК 621.313.333

## О НЕКОТОРЫХ СПОСОБАХ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ: ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИЕ И СТОХАСТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

**Н. В. ГРУНТОВИЧ, О. В. ЧАУС**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### Введение

В процессе вибродиагностирования различных механизмов на практике встречаются случаи, когда при разных дефектах (частотах вибрации) амплитуда вибрации принимает одинаковое значение. В этих случаях возникает неопределенность при классификации дефектов, а именно: непонятно какой из дефектов доминирует. Для решения данной задачи можно использовать вероятностные методы. Для применения вероятностных методов необходимы соответствующие статистические данные дефектов и признаков. Эксплуатационный персонал, как правило, такими данными не располагает.

Цель данной статьи: предложить способ решения задачи классификации дефектов на основе детерминированных и индетерминированных (вероятностных) методов.

### Классификация оборудования по техническому состоянию на основе теории вероятности по бинарным признакам

Рассмотрим применение теории вероятности [1] для распознавания неисправностей трех электроконденсаторных насосов (образцов) ЭКН А (неисправность  $R_1$ ), ЭКН Б (неисправность  $R_2$ ), ЭКН В (неисправность  $R_3$ ) по изменению вибрации в диапазоне четырех частот  $x_1$  {144,5 – 146 Гц},  $x_2$  {77 – 80 Гц},  $x_3$  {74,5 – 76 Гц},  $x_4$  {46–47,7 Гц}. Обучающая последовательность для расчета задана в табл. 1.

Таблица 1

Обучающая последовательность

Неисправность														
$R_1$					$R_2$					$R_3$				
ЭБ	Признаки				ЭБ	Признаки				ЭБ	Признаки			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
1	+1	-1	-1	-1	6	+1	-1	+1	-1	11	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	+1	-1	7	-1	+1	+1	-1	12	-1	-1	-1	-1
3	-1	-1	+1	-1	8	-1	+1	+1	+1	13	-1	-1	-1	-1
4	+1	-1	-1	+1	9	-1	+1	+1	-1	14	-1	+1	-1	-1
5	+1	-1	-1	-1	10	+1	-1	+1	-1	15	-1	+1	-1	-1

Для каждого информативного интервала частот выбираем пороговое значение уровня вибрации на основании эталонных характеристик критического износа согласно стандарту ISO. В рассматриваемом примере выборка составляет 15 энергоблоков (ЭБ). Если уровень вибрации выше порога, то принимаем «+1», если ниже,

принимая «-1». То есть если  $A_m > A_{кр}$ , принимаем  $x = +1$ , если  $A_m < A_{кр}$  или такой признак отсутствует, принимаем  $x = -1$ , где  $A_m$  и  $A_{кр}$  – текущее и критическое значения. Например, признак  $x_2$  для ЭКН А отсутствует. Отсутствуют признаки  $x_1, x_3, x_4$  для ЭКН В. Необходимо распознать причину вибрации фундамента по набору бинарных признаков

$$x(x_1, x_2, x_3, x_4) = -1 - 1 + 1 + 1.$$

Определим условные вероятности:

$$P(x_1 / R_1) = 0,8; \quad P(x_1 / R_2) = 0,4; \quad P(x_1 / R_3) = 0.$$

$P(x_1 / R_1)$  – условная вероятность того, что уровень амплитуды вибрации фундамента на частоте 144,5–146 Гц обусловлен неисправностью  $R_1$  (например, повышенным зазором подшипника качения насоса ЭКН А). Эти данные выражают накопленный опыт и хранятся в памяти компьютера.

Остальные условные вероятности рассчитываются аналогично. Результаты расчетов сведем в табл. 2.

Таблица 2

#### Условные вероятности

$P(x_i / R_i)$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
$R_1$	0,8	0	0,4	0,2
$R_2$	0,4	0,6	1	0,2
$R_3$	0	0,4	0	0

Далее определяем вероятности и их дополнения до единицы с учетом всех объектов, результаты расчетов сведем в табл. 3:

$$P(x_1) = 6/15 = 0,4; \quad 1 - P(x_1) = 0,6.$$

Таблица 3

#### Вероятности и их дополнения до единицы с учетом всех объектов

$P(x_i)$	0,4	0,33	0,47	0,13
$1 - P(x_i)$	0,6	0,67	0,53	0,87

$P(x_1)$  – вероятность наличия признака  $x_1$  во всех трех насосах (в 15-ти энергоблоках). Рассчитаем коэффициенты влияния признаков [2]. При наличии признака пользуемся формулой

$$r_k = \frac{P(x_j / R_k)}{P(x_j)}.$$

При отсутствии признака – формулой

$$r_k = \frac{1 - P(x_j / R_k)}{1 - P(x_j)}.$$

Результаты расчетов сведем в табл. 4, нули заменены малой величиной 0,01.

Таблица 4

## Коэффициенты влияния признаков

$r_k$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
<b>При наличии признака (<math>x_i = +1</math>)</b>				
$R_1$	2	0,01	0,85	1,54
$R_2$	1	1,82	2,13	1,54
$R_3$	0,01	1,21	0,01	0,01
<b>При отсутствии признака (<math>x_i = -1</math>)</b>				
$R_1$	0,33	1,48	1,13	0,92
$R_2$	1	0,6	0,02	0,92
$R_3$	1,65	0,9	1,87	1,14

Априорные вероятности дефектов должны быть заданы на основании предыдущего опыта. Допустим, что у нас нет никаких сведений, кроме обучающей последовательности, а различаемые дефекты равноценны. Тогда принимаем:

$$P(R_1) = 0,33;$$

$$P(R_2) = 0,33;$$

$$P(R_3) = 0,33.$$

Так как автоматическая система контроля определила искажение вибрации фундамента в виде бинарных признаков:

$$x(x_1; x_2; x_3; x_4) = -1 - 1 + 1 + 1,$$

то на выходе решающего блока получим:

$$\Sigma_1 = P(R_1 / x_1 x_2 x_3 x_4) = P(R_1) r_1' r_2' r_3' r_4' = 0,33 \cdot 0,33 \cdot 1,48 \cdot 0,85 \cdot 1,5 = 0,205;$$

$$\Sigma_2 = 0,633;$$

$$\Sigma_3 = 0,000049.$$

Следовательно, гипотезы о причине искажения вибрации фундамента можно поставить в следующей последовательности:

1. Неисправность ЭКН Б (проверить подшипники и балансировку) – вероятность 0,633.

2. Неисправность ЭКН А (проверить подшипники и балансировку) – вероятность 0,205.

Задача распознавания рассмотрена для случая, когда имеется автоматическая система контроля за вибрацией фундамента, на котором размещаются механизмы, обладающая памятью и классификатором.

### Распознавание причин искажения вибрации фундамента на основе теории нечетких множеств [3]

Для примера возьмем цифровые данные в диапазоне частот  $x_1$  {144,5–146 Гц},  $x_2$  {77–80 Гц},  $x_3$  {74,5–76 Гц},  $x_4$  {46–47,7 Гц}, в котором вибрация фундамента изменяется под воздействием механизмов ЭКН А, ЭКН Б, ЭКН В. Известны пороговые значения вибрации, которые представлены в табл. 5.

Таблица 5

Пороговые значения вибрации

Вибрация, дБ	Диапазон частот, Гц			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
	144,5–146	77–80	74,5–76	46–47,7
А (ЭКН А)	75	0	71	70
В (ЭКН Б)	80	65	78	85
С (ЭКН В)	0	60	0	0

«Ноль» означает, что сигнала на данной частоте нет. Измерен сигнал поля фундамента:

$$x_1 = 70 \text{ дБ}; x_2 = 58 \text{ дБ}; x_3 = 80 \text{ дБ}; x_4 = 86 \text{ дБ}.$$

Необходимо определить, какой из механизмов оказывает наибольшее воздействие на вибрацию фундамента. Воспользуемся обобщенным расстоянием Хемминга [4]:

$$d(A, B) = \sum_{i=1}^n |\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i)|,$$

где  $A, B$  – нечеткие множества;  $\mu_A(x_i)$  – функция принадлежности элемента  $x_i$  множеству  $A$ ;  $\mu_A(x_i), \mu_B(x_i) \in [0, 1]; i = 1; 2; \dots; n$ .

Чтобы воспользоваться этим правилом, перейдем к относительным единицам. За базовое значение вибрации примем 100 дБ. Тогда текущее значение параметров поля можно записать:

$$x_1 = 0,7 \text{ дБ}; x_2 = 0,58 \text{ дБ}; x_3 = 0,8 \text{ дБ}; x_4 = 0,86 \text{ дБ}.$$

Таким же образом можно переписать пороговые значения табл. 5. Тогда обобщенное относительное расстояние Хемминга [4]:

$$\delta(A, X) = \frac{d(A, X)}{n};$$

$$\delta(B, X) = \frac{d(B, X)}{n};$$

$$\delta(C, X) = \frac{d(C, X)}{n};$$

$$\delta(A, X) = \frac{1}{4} (|0,75 - 0,7| + |0 - 0,58| + |0,71 - 0,8| + |0,7 - 0,86|) = \frac{0,88}{4} = 0,22.$$

Следовательно, мера близости  $\delta(A, X)$  для ЭКН А равна 0,22.

Мера близости для ЭКН Б  $\delta(B, X) = 0,045$ .

Мера близости для ЭКН В  $\delta(C, X) = 0,595$ .

Следовательно, основной вклад в изменение вибрации фундамента вносит ЭКН Б, так как мера близости равна 0,045.

### Прогнозирование технического состояния оборудования по методу Байеса

Современные методы диагностирования позволяют выявить дефекты на основе практических математических моделей. На практике часто бывает, когда разные дефекты характеризуются одинаковым уровнем вибрации. Возникает задача неопределенности. Тогда при наличии определенной статистики применяют метод Байеса [5].

Если имеется диагноз  $D_i$  и простой признак  $x_j$ , встречающийся при этом диагнозе, то вероятность совместного появления событий (наличие у механизма состояния  $D_i$  и признака  $x_j$ ):

$$P(D_i / x_j) = P(D_i) \frac{P(x_j / D_i)}{P(x_j)},$$

где  $P(D_i)$  – вероятность диагноза  $D_i$ , определяемая статистическими данными (априорная вероятность диагноза). Так если предварительно обследовано  $N$  механизмов и у  $N_i$  имелось состояние  $D_i$ , то

$$P(D_i) = \frac{N_i}{N}.$$

$P(x_j / D_i)$  – вероятность появления признака  $x_j$  у механизмов с состоянием  $D_i$ .

Если среди  $N_i$  механизмов, имеющих диагноз  $D_i$ , у  $N_{ij}$  механизмов появился признак  $x_j$ , то

$$P(x_j / D_i) = \frac{N_{ij}}{N_i}.$$

$P(x_j)$  – вероятность появления признака  $x_j$  во всех механизмах независимо от состояния (диагноза) объекта.

Пусть из общего числа  $N$  механизмов признак  $x_j$  был обнаружен у  $N_j$  механизмов, тогда

$$P(x_j) = \frac{N_j}{N}.$$

Для установления диагноза специальное вычисление  $P(x_j)$  не требуется. Как будет ясно из дальнейшего, значения  $P(D_i)$  и  $P(x_j / D_i)$  известные для всех возможных состояний, определяют величину  $P(x_j)$ .

$P(D_i / x_j)$  – апостериорная вероятность диагноза  $D_i$ , т. е. вероятность диагноза  $D_i$  после того, как стало известно наличие у рассматриваемого механизма признака  $x_j$ .

Когда распознавание проводится по комплексу признаков  $X^*$ , включающему признаки  $x_1, x_2, \dots, x_j$ , то используется обобщенная формула Байеса.

Формула Байеса для комплекса признаков имеет вид:

$$P(D_i / X^*) = P(D_i) \frac{P(X^* / D_i)}{P(X^*)}, (i = 1; 2; \dots; n),$$

где  $P(D_i / X^*)$  – вероятность диагноза  $D_i$  после того, как стали известны результаты обследования по комплексу признаков  $X^*$ ;  $P(D_i)$  – предварительная вероятность диагноза  $D_i$  (по предшествующей статистике).

Каждый из признаков  $x_j$  имеет  $m_j$  разрядов ( $x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{js}$ ).

Индекс «\*» означает конкретное значение признака.

Если комплекс признаков состоит из  $v$  признаков, то

$$P(X^* / D_i) = P(x_1^* / D_i) P(x_2^* / x_1^* D_i) \dots P(x_v^* / x_1^* \dots x_{v-1}^* D_i),$$

где  $x_j^* = x_{js}$  – разряд признака, выявившийся в результате анализа.

Для диагностически независимых признаков

$$P(X^* / D_i) = P(x_1^* / D_i) P(x_2^* / D_i) \dots P(x_v^* / D_i).$$

Например, увеличение уровня вибрации электрических машин и насосов в результате неуравновешенности ротора, зазора в подшипнике, износа поверхности тел качения и колец можно принять как условие независимости признаков.

Вероятность появления комплекса признаков:

$$P(X^*) = \sum_{s=1}^n P(D_s) P(X^* / D_s).$$

Обобщенная формула Байеса может быть записана так:

$$P(D_i / X^*) = \frac{P(D_i) P(X^* / D_i)}{\sum_{s=1}^n P(D_s) P(X^* / D_i)}.$$

Отметим, что сумма вероятностей всех возможных реализаций признака равна единице.

Знаменатель формул Байеса для всех диагнозов одинаков. Это позволяет сначала определить вероятности совместного появления  $i$ -го диагноза и данной реализации комплекса признаков:

$$P(D_i / X^*) = P(D_i) P(X^* / D_i),$$

а затем апостериорную вероятность диагноза:

$$P(D_i / X^*) = P(D_i X^*) / \sum_{s=1}^n P(D_s X^*).$$

Для определения вероятности диагнозов по методу Байеса необходимо составить диагностическую матрицу, которая формируется на основе предварительно статистического материала (табл. 6).

Таблица 6

Диагностическая матрица асинхронных двигателей в методе Байеса

Диагноз $D_i$ асинхронного двигателя	Признак			$P(D_i)$
	Вибрация под- шипника каче- ния $x_1$	Износ изоляции обмотки статора $x_2$	Неуравновешен- ность ротора $x_3$	
	$P(x_1 / D_i)$	$P(x_2 / D_i)$	$P(x_3 / D_i)$	
$D_1$ (АД1)	0,25	0,24	0,3	0,31
$D_2$ (АД2)	0,15	0,3	0,2	0,2
$D_3$ (АД3)	0,3	0,2	0,35	0,45
...	...	...	...	...

Цифровые значения в таблице представлены эвристически, так как получить достоверную выборку данных не представилось возможным. В такой таблице содержатся вероятности разрядов признаков при различных диагнозах.

Процесс обучения в методе Байеса состоит в формировании диагностической матрицы. Диагностическая матрица хранится в базе знаний автоматизированной системы технического диагностирования. На основании такой таблицы диспетчер, технолог или оператор технической диагностики может определить вероятности отказов различных узлов диагностируемых механизмов, т. е. проделать ранжирование прогнозируемых событий с учетом вероятности их возникновения. По результатам ранжировки оператор проводит плановое диагностирование механизмов при помощи других методов, например, анализ виброакустических характеристик, измерение сопротивления изоляции обмоток электрических машин и др.

Целесообразно предусмотреть возможность уточнения таблицы в процессе диагностики. для этого в памяти компьютера следует хранить не только значения  $P(x_{js}/D_i)$ , но и следующие параметры:

$N_i$  – число механизмов с диагнозом  $D_i$ ;

$N_{ij}$  – число механизмов с диагнозом  $D_i$ , обследованных по признаку  $x_j$ .

Если поступает новый механизм с диагнозом  $D_\mu$ , то проводится корректировка прежних и введение новых априорных вероятностей диагнозов следующим образом:

$$P(D_i) = \frac{N_i}{N+1} = P(D_i) \frac{N}{N+1};$$

$$P(D_\mu) = \frac{N_{\mu+1}}{N+1} = P(D_\mu) \frac{N}{N+1} + \frac{1}{N+1};$$

$i = 1; 2; \dots; n; i = \mu.$

Далее проводятся поправки к вероятностям признаков. Если у нового объекта с диагнозом  $D_\mu$  выявлен разряд  $k$  признака  $x_i$ , тогда для дальнейшей диагностики принимаются новые значения вероятности интервалов признака  $x_j$  при диагнозе  $D_\mu$ :

$$P(x_{js} D_\mu) = \begin{cases} P(x_{js} D_\mu) \frac{N_{\mu j}}{N_{\mu j} + 1}, & s \neq k; \\ P(x_{js} D_\mu) \frac{N_{\mu j}}{N_{\mu j} + 1} + \frac{1}{N_{\mu j} + 1}, & s = k. \end{cases}$$

Условные вероятности признаков при других диагнозах корректировки не требуют.

Применяя обобщенную формулу Байеса и числовые значения из табл. 6, определим вероятность выхода из строя АД1, АД2, АД3 в результате выхода из строя только подшипников. Вероятность события для АД1:

$$P(D_1 / x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3) = \frac{P(D_1)P(x_1 / D_1)P(\bar{x}_2 / D_1)P(\bar{x}_3 / D_1)}{A_1 + A_2 + A_3},$$

где  $A_1 = P(D_1)P(x_1 / D_1)P(\bar{x}_2 / D_1)P(\bar{x}_3 / D_1)$ ;  $A_2 = P(D_2)P(x_1 / D_2)P(\bar{x}_2 / D_2)P(\bar{x}_3 / D_2)$ ;  
 $A_3 = P(D_3)P(x_1 / D_3)P(\bar{x}_2 / D_3)P(\bar{x}_3 / D_3)$ ;

$$P(D_1 / x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3) = 0,322;$$

$$P(D_2 / x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3) = 0,131;$$

$$P(D_3 / x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3) = 0,547.$$

Проведенное прогнозирование показывает, что наибольшую вероятность отказа имеют подшипники АДЗ. Следовательно, нужно начинать плановое диагностирование или ремонт АДЗ.

После анализа и обработки отказов специалистами службы технической диагностики формируется диагностическая матрица, которая хранится в памяти автоматизированной системы информационной поддержки операторов.

#### **Заключение**

1. В статье на конкретных примерах продемонстрирована работа трех методов: метод бинарных признаков, основанный на вероятностных закономерностях; метод Хемминга, основанный на понятии обобщенного расстояния (из теории нечетких множеств) и метод Байеса прогнозирования технического состояния оборудования.

2. Первым методом была найдена вероятность того, что неисправен ЭКН Б, равная 0,633.

3. Вторым методом получено, что причиной искажения вибрации фундамента также является ЭКН Б.

4. Теоретические расчеты, проведенные для системы двигателей по методу Байеса, дают хорошее совпадение с результатами эксперимента ( $\approx 95\%$ ).

#### **Литература**

1. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов / Е. С. Вентцель. – 6-е изд. стер. – М. : Высш. шк., 1999. – 576 с. : ил.
2. Васильев, Б. В. Прогнозирование надежности и эффективности радиоэлектронных устройств / Б. В. Васильев. – М. : Совет. радио, 1970. – 336 с.
3. Коньшева, Л. К. Основы теории нечетких множеств : учеб. пособие / Л. К. Коньшева, Д. М. Назаров. – СПб. : Питер, 2011. – 192 с. : ил.
4. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств : пер. с фр. / А. Кофман. – М. : Радио и связь, 1982. – 432 с. : ил.
5. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с. : ил. – (Надежность и качество).

*Получено*