

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТОВОГО МЕТОДА

Г.В. Суханкин

*В статье приведена методика определения состояния технического объекта на основе алгоритма Байеса. Рассмотрен конкретный пример диагностирования электротехнического устройства.*

*Ключевые слова: диагностика, диагностический признак, метод Байеса, априорная вероятность.*

Состояние технического объекта обычно характеризуется вектором диагностических признаков (ДП):

$$X^* = \{D_{\text{dmin}} D_{\text{dmax}} \underline{D}_v D_b D_w T_o T_1 T_m\} \quad (1)$$

где  $D_{\text{dmin}}$  – величина, характеризующая отклонение ДП от начального значения,  $D_{\text{dmax}}$  – величина, характеризующая отклонение ДП от максимально возможного,  $\underline{D}_v$  – величина, характеризующая скорость изменения ДП,  $D_b$  – величина, характеризующая соотношение между ДП,  $D_w$  – величина, характеризующая вес признака,  $T_o$  – величина, характеризующая тип объекта  $T_1$  – величина, характеризующая конструктивные особенности объекта,  $T_m$  – величина, характеризующая методику измерения [1]. Практическая реализация диагностики по вектору (1) вызывает трудности, в

том числе и в силу многообразия конструктивных особенностей объекта. Гораздо проще диагностировать объект, используя набор универсальных признаков, однозначно характеризующий его в любой момент его жизненного цикла. В этом случае удобно определять состояние объекта по алгоритму Байеса.

Рассмотрим диагностику, использующую алгоритм Байеса. Метод Байеса относится к вероятностным методам диагностики и характеризуется простотой и эффективностью. Если диагностические признаки имеют два состояния, то их значения могут выражаться «в норме» или «не в норме», по-другому, «1» или «0». Диагностируемое устройство может находиться в одном из  $n$ -состояний, которые представлены в диагностической матрице [2, 3].

Таблица 1– Диагностическая матрица

Состояние объекта $D_i$	ДП										$P(D_i)$
	$x_1$			$x_2$			$x_v$				
$D_1$	$P(x_{1,1}/D_1)$	...	$P(x_{1,m1}/D_1)$	$P(x_{2,1}/D_1)$	...	$P(x_{2,m2}/D_1)$	...	$P(x_{v,1}/D_1)$	...	$P(x_{1,mv}/D_1)$	
$D_2$											
...											
$D_n$											

Исходными данными для диагностики являются:

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

где  $P(D_i)$  – вероятность диагноза  $D_i$ ;  $N_i$  – число объектов, находящихся в состоянии  $D_i$ ;  $N$  – число заранее диагностируемых объектов.

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

где  $P(x_j/D_i)$  – вероятность появления признака  $x_j$  у объектов с состоянием  $D_i$ ;

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

где  $P(x_j)$  – вероятность появления признака  $x_j$  во всех объектах;  $N_j$  – число объектов, у которых был обнаружен признак  $x_j$ .

Диагностирование технического объекта производится по следующей формуле:

$$P(D_i/X^*) = \frac{P(X^*/D_i)}{\sum_{r=1}^n P(D_r)P(X^*/D_r)}, \quad (2)$$

где  $P(D_i/X^*)$  – вероятность состояния  $D_i$  после того, как стали известны результаты обследования по набору признаков  $X^*$ ;  $P(D_i)$  – априорная вероятность диагноза  $D_i$ ;  $P(X^*/D_i)$  – вероятность появления набора признаков  $X^*$  при наличии диагноза  $D_i$ ;  $P(X^*) = \sum_{r=1}^n P(D_r)P(X^*/D_r)$  – вероятность появления набора признаков  $X^*$ .

Для независимых признаков:

$$P(X^*/D_i) = P(x_{1,1}/D_i) \cdot P(x_{2,1}/D_i) \cdot P(x_{v,1}/D_i)$$

Для определения состояния объекта су-

ществует диагностическое правило:

$$X^* \in D_\mu, \text{ если } P(D_\mu/X^*) > P(D_i/X^*), i = 1, 2, \dots, n, \mu \neq i$$

Кроме того, выбранный диагноз должен удовлетворять решающему правилу:

$$P(D_\mu/X^*) \geq P_\mu,$$

где  $P_\mu$  – пороговый уровень диагноза  $D_\mu$ , заданный экспертом заранее. Обычно порог принимается равным 0,85–0,95. Если вышеприведённое неравенство не выполняется, то решение по диагнозу откладывается и производится дальнейшее уточнение поступивших априорных данных.

Таким образом, при новых ДП вновь поступившего объекта производится перерасчёт диагностической матрицы в соответствии с уравнениями:

$$P'(D_i) = \begin{cases} \frac{N_i}{N+1} = P(D_i) \frac{N}{N+1}; i = 1, 2, 3, \dots, n; i \neq \mu; \\ \frac{N_{\mu+1}}{N+1} = P(D_\mu) \frac{N}{N+1} + \frac{1}{N+1}; i = \mu, \end{cases} \quad (3)$$

где  $P'(D_i)$  – скорректированное значение априорной вероятности диагноза.

Корректировка вероятностей разрядов  $r$  признака  $x_i$  нового объекта с диагнозом  $D_\mu$  производится по следующим формулам:

$$P'(x_{j,s}/D_\mu) = \begin{cases} P'(x_{j,s}/D_\mu) \frac{N_\mu}{N_{\mu+1}}; s \neq r; \\ P'(x_{j,r}/D_\mu) \frac{N_\mu}{N_{\mu+1}} + \frac{1}{N_{\mu+1}}; s = r. \end{cases} \quad (4)$$

При этом корректировка вероятностей признаков других диагнозов не требуется [4].

Алгоритм работы системы диагностики, описанной выше приведён на рисунке 1.

В соответствии с алгоритмом диагностирования была разработана диагностическая система (ДС), работающая в среде VBA (Visual Basic Application) и Excel.

Рассмотрим ДС для определения состояния асинхронного электродвигателя серии АИР 90, мощностью 3 кВт.

Исходными данными для ДС являются 9 ДП, имеющие два состояния 0 и 1:

1. Ток холостого хода (1 – низкий, 0 – высокий);
2. Воздушный зазор между статором и ротором (1 – низкий, 0 – высокий);
3. Сопротивление изоляции статора (1 – высокое, 0 – низкое);
4. Отклонение сопротивления обмоток (1 – низкое, 0 – высокое);
5. Коэффициент абсорбции (1 – высокий, 0 – низкий);
6. Коэффициент поляризации (1 – высокий, 0 – низкий);
7. Модуль упругости (1 – низкий, 0 – высокий);

8. Шум подшипников (1 – низкий, 0 – высокий);

9. Мощность частичных разрядов (1 – низкая, 0 – высокая).

Лучшие состояния объекта представлены единицей, худшие – нулём.

Исследуемый объект может находиться в шести состояниях:

1. D0 – исправен или близок к исправному;
2. D1 – 25 % износа;
3. D2 – 50 % износа;
4. D3 – 75 % износа;
5. D4 – Близок к выходу из строя;
6. D5 – Эксплуатация нецелесообразна по экономическим причинам.

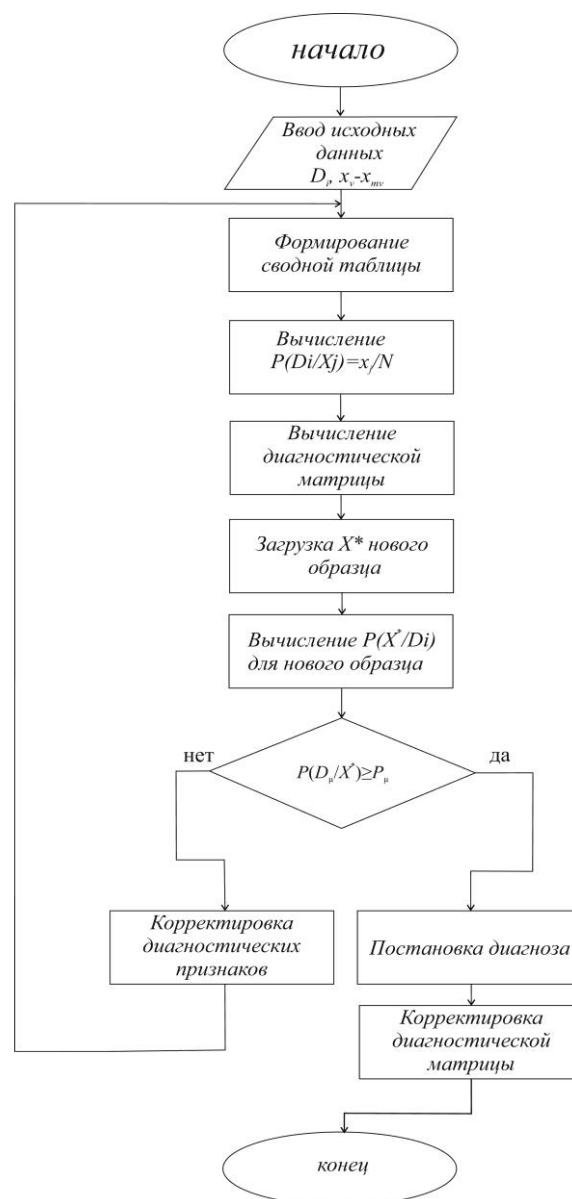


Рисунок 1 – Алгоритм диагностирования технического объекта с использованием алгоритма Байеса

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО МЕТОДА

Данные наблюдений собираются в исходную таблицу 1.

В качестве примера в таблице 1 приведены данные первых 12 наблюдений.

Каждый из ДП разбивается на две колонки, причём в первой указывается наилучшее состояние объекта, во второй – наихудшее.

Суммирование по колонкам таблицы 1 производится с помощью VBA по следующему алгоритму:

1. Range("C57:T62") = 0
2. For i = 0 To 18
3. For Each cell In [B4:B53]
4. If cell. Value Like "D0" Then

5. x = cell. Row

6. y = cell. Column + 1 + i

7. Cells(57, 3 + i) = Cells(x, y) + Cells(57, 3 + i)

8. Endlf

9. Next

10. Nexti

В строке 1 алгоритма производится обнуление ячеек сводной таблицы. Строки 2–10 производят обход всех ДП исходных данных. Строки 3–9 определяют ДП, содержащие состояние D0. Для D1–D5 алгоритм подсчёта аналогичный. Полученные данные сводятся в таблицу 2.

Таблица 1 – Исходные данные

N наблюдения	Состояние	Диагностические признаки																	
		x11	x12	x21	x22	x31	x32	x41	x42	x51	x52	x61	x62	x71	x72	x81	x82	x91	x92
1	D0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
2	D5	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1
3	D4	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1
4	D1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1
5	D4	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
6	D2	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
7	D3	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1
8	D0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
9	D0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
10	D5	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0
11	D5	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0
12	D1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0

Таблица 2 – Сводные данные

Состояние	Суммы по соответствующим полям																		Число реализаций Di
	x11	x12	x21	x22	x31	x32	x41	x42	x51	x52	x61	x62	x71	x72	x81	x82	x91	x92	
D0	2	10	0	12	3	9	11	1	9	3	12	0	12	0	6	6	11	1	12
D1	1	7	0	8	8	0	8	0	6	2	7	1	8	0	3	5	7	1	8
D2	1	8	0	9	1	8	7	2	9	0	9	0	9	0	4	5	8	1	9
D3	7	1	0	8	7	1	8	0	7	1	0	8	1	7	4	4	0	8	8
D4	6	0	5	1	3	3	4	2	3	3	2	4	1	5	5	1	3	3	6
D5	7	0	7	0	0	7	6	1	1	6	1	6	5	2	6	1	2	5	7
Итого	24	26	12	38	22	28	44	6	35	15	31	19	36	14	28	22	31	19	50

При делении данных сводной таблицы на общее число наблюдений получаем таблицу 3.

Результат деления данных таблицы 3 на  $P(D_i)$  сведён в таблицу 4.

Таблица 3 – Результат операции  $P(D_i/X_j)=x_{ij}/N$

	x11	x12	x21	x22	x31	x32	x41	x42	x51	x52	x61	x62	x71	x72	x81	x82	x91	x92
D0	0,04	0,2	0	0,24	0,06	0,18	0,22	0,02	0,18	0,06	0,24	0	0,24	0	0,12	0,12	0,22	0,02
D1	0,02	0,14	0	0,16	0,16	0	0,16	0	0,12	0,04	0,14	0,02	0,16	0	0,06	0,1	0,14	0,02
D2	0,02	0,16	0	0,18	0,02	0,16	0,14	0,04	0,18	0	0,18	0	0,18	0	0,08	0,1	0,16	0,02
D3	0,14	0,02	0	0,16	0,14	0,02	0,16	0	0,14	0,02	0	0,16	0,02	0,14	0,08	0,08	0	0,16
D4	0,12	0	0,1	0,02	0,06	0,06	0,08	0,04	0,06	0,06	0,04	0,08	0,02	0,1	0,1	0,02	0,06	0,06
D5	0,14	0	0,14	0	0	0,14	0,12	0,02	0,02	0,12	0,02	0,12	0,1	0,04	0,12	0,02	0,04	0,1

Таблица 4 – Диагностическая матрица с данными

	x11	x12	x21	x22	x31	x32	x41	x42	x51	x52	x61	x62	x71	x72	x81	x82	x91	x92	$P(D_i)=D_i/N$	
D0	0,17	0,83	0	1	0,25	0,75	0,917	0,083	0,75	0,25	1	0	1	0	0,5	0,5	0,917	0,083	0,24	
D1	0,13	0,88	0	1	1	0	1	0	0,75	0,25	0,875	0,125	1	0	0,375	0,625	0,875	0,125	0,16	
D2	0,11	0,89	0	1	0,111	0,889	0,778	0,222	1	0	1	0	1	0	0,444	0,556	0,889	0,111	0,18	
D3	0	0,13	0	1	0,875	0,125	1	0	0,875	0,125	0	1	0,125	0,875	0,5	0,5	0	1	0,16	
D4	1	0	0,83	0,167	0,5	0,5	0,667	0,333	0,5	0,5	0,333	0,667	0,167	0,833	0,833	0,167	0,5	0,5	0,12	
D5	1	0	1	0	0	1	0,857	0,143	0,143	0,857	0,143	0,857	0,714	0,286	0,857	0,143	0,286	0,714	0,14	
																			Итого	1

Для определения состояния вновь диагностируемого объекта с вектором ДП, представленном в таблице 5 формируется набор

$P(K^*/D_i)$ , сформированных в этой же таблице. И, наконец, окончательные расчёты по (2) представлены в таблице 6

Таблица 5 – Результаты диагностики

Диагностируемый образец $K^*$	x11	x12	x21	x22	x31	x32	x41	x42	x51	x52	x61	x62	x71	x72	x81	x82	x91	x92
		1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0
$P(K^*/D0)$	0,17	0	0	0	0,25	0	0	0,083	0,75	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0,083
$P(K^*/D1)$	0,13	0	0	0	1	0	0	0	0,75	0	0	0,125	0	0	0,375	0	0	0,125
$P(K^*/D2)$	0,11	0	0	0	0,111	0	0	0,222	1	0	0	0	0	0	0,444	0	0	0,111
$P(K^*/D3)$	0	0	0	0	0,875	0	0	0	0,875	0	0	1	0	0,875	0,5	0	0	1
$P(K^*/D4)$	1	0	0,83	0	0,5	0	0	0,333	0,5	0	0	0,667	0	0,833	0,833	0	0	0,5
$P(K^*/D5)$	1	0	1	0	0	0	0	0,143	0,143	0	0	0,857	0	0,286	0,857	0	0	0,714

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТОГО МЕТОДА

Таблица 6 – Определение состояния объекта

Диагностируемый образец с $X^*$	$P(X^*/D_i)$	$P(D_i)P(X^*/D_i)$	$P(D_i/x_j)$
$P(K^*/D_0)$	0,001302	0,000313	0,005271
$P(K^*/D_1)$	0,004395	0,000703	0,01186
$P(K^*/D_2)$	0,001219	0,000219	0,003702
$P(K^*/D_3)$	0,334961	0,053594	0,903977
$P(K^*/D_4)$	0,03215	0,003858	0,065074
$P(K^*/D_5)$	0,004284	0,0006	0,010116
		0,059287	

Как видно из таблицы 6 наибольшей вероятностью обладает диагноз D3. При поступлении нового объекта для определения его состояния производится перерасчёт таблицы 2–6. по (3, 4). Конкретные номера ячеек вышеприведённого алгоритма определяются положением таблиц с данными в среде Excel.

Сравнительный анализ рассмотренной диагностической системы и подобной системы, функционирующей на основе нейронной обучающейся сети показывает, что их возможности примерно одинаковы [5].

служивания высоковольтного маслонаполненного оборудования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Давиденко И. В. – Екатеринбург, 2009. – 45 с.

2. Глущенко, П. В. Техническая диагностика / П. В. Глущенко. – М. : Вузовская книга, 2004. – 248 с.

3. <http://www.studfiles.ru/preview/2715665/>.

4. Стецюк, А. Е. Основы технической диагностики. Теория распознавания / А. Е. Стецюк, А. Ю. Бобровников. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2012. – 69 с.

5. Суханкин, Г. В. Диагностическая система оценки состояния технического объекта на основе обучающейся нейронной сети / Г. В. Суханкин // Вестник алтайской науки. – 2012. – № 2. – С. 143–147.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давиденко, И. В. Разработка системы многоаспектной оценки технического состояния и об-

**Суханкин Геннадий Владимирович**,  
к.т.н., директор ИПЦ АлтГТУ, тел.: 29-07-44, e-mail: gen195@mail.ru.