

## **ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЙ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ**

Анализ характера задачи распознавания состояний объектов управления в случае, когда между признаками объекта и состояниями, к которым они могут быть отнесены существуют вероятностные связи, показал, что построение алгоритмов распознавания может быть основано на результатах теории статистических решений.

Одним из самых простых и эффективных средств статистического анализа является метод Байеса. Этот метод представляет процесс последовательного накопления новой информации, позволяющий произвести переоценку свойств объекта и пересмотреть ранее принятые решения на основании минимального объема данных. Классические методы требуют использования очень больших объемов эмпирических данных, что не всегда возможно [1,2].

Специфика и условия работы объектов управления при бурении скважины показывают, что явления происходящие при этом часто носят непредсказуемый, случайный характер. Поэтому наряду с детерминированными методами требуется и вероятностный подход присущий случайным процессам.

Особенно остро проблема оценки состояния объектов управления, находящихся в скважине проявляется в настоящее время так как отказ оборудования в процессе эксплуатации может привести к очень серьезным последствиям. А применение вероятностно-статистических методов при распознавании состояний объектов в процессе эксплуатации должно уменьшить количество отказов бурового и нефтепромыслового оборудования.

В качестве объекта управления рассмотрим систему «турбобур- долото» (Т-Д), используемую в процессе бурения скважины, образующая множество  $D$  состояний, связанных с ней систему признаков  $K$ . Статистическая информация получена в результате обработки промысловых измерений графиков временных рядов по колебаниям давления промысловочной жидкости и колебаний осевой нагрузки на долото, сопровождающих работу систему «Т-Д». В таблицах 1 и 2 приведены варианты диагностической матрицы Байеса при построении которых в качестве независимых диагностических признаков ( $K_j$ ) при оценке технического состояния системы «Т-Д» использованы: амплитуда спектральной плотности ( $S$ ), число выбросов за установленный уровень ( $v$ ); энтропийный анализ ( $\Phi$ ); коэффициенты Джини ( $D_j$ ) и вариации ( $V$ ). При построении диагностической матрицы использован экспертный метод [3], а область ее применения ограничивается пределами обработанного статистического материала для конкретных условий бурения скважины Самотлорского месторождения.

Одной из важных задач диагностирования состояния объектов является использование признаков (критериев) с наибольшей диагностической ценностью или весом. Известно несколько подходов к оценке диагностической ценности признака [4]. Часто используется понятие диагностический вес реализации

Таблица 1 - Вариант диагностической матрицы по методу Байеса с использованием колебаний давления промывочной жидкости

Диаг ноз	Критерии оценки технического состояния системы «долото-турбобур», $K_i$														
	S, спектр, с			$v$ , выбросы, $c^{-1}$			$\Phi$ , энтропия			Дж, джини			V, вариация		
	$K_{11}$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K_{21}$	$K_{22}$	$K_{23}$	$K_{31}$	$K_{32}$	$K_{33}$	$K_{41}$	$K_{42}$	$K_{43}$	$K_{51}$	$K_{52}$	$K_{53}$
	10- 15	15- 30	30- 60	0,030- 0,035	0,035- 0,040	0,040- 0,045	1,00- 1,05	1,05- 1,15	1,15- и >	до 0,94	0,94- 0,97	0,97- 0,99	0,003- 0,020	0,020- 0,030	0,03 0>
$D_1$	0,10	0,20	0,70	0,10	0,35	0,55	0,16	0,21	0,63	0,09	0,33	0,58	0,15	0,25	0,60
$D_2$	0,30	0,40	0,30	0,44	0,34	0,22	0,65	0,20	0,15	0,48	0,29	0,23	0,61	0,24	0,15
$P(K_j)$	0,17	0,27	0,55	0,22	0,34	0,43	0,34	0,13	0,45	0,23	0,31	0,45	0,32	0,24	0,43
$Z_{D1}$	-0,76	-0,43	0,34	-1,15	0,04	0,35	-1,09	0,68	0,48	-1,36	0,08	0,36	-1,09	0,05	0,47
$Z_{D2}$	0,81	0,56	-0,89	1,00	0	-0,97	0,93	0,62	-1,60	1,05	-0,10	-0,97	0,92	0	-1,51

Таблица 2 - Вариант диагностической матрицы по методу Байеса и использованием колебаний осевой нагрузки на долото

Диаг- ноз	Критерии оценки технического состояния системы «долото-турбобур», $K_i$														
	S, спектр, с			$v$ , выбросы, $c^{-1}$			$\Phi$ , энтропия			Дж, джини			V, вариация		
	$K_{61}$	$K_{62}$	$K_{63}$	$K_{71}$	$K_{72}$	$K_{73}$	$K_{81}$	$K_{82}$	$K_{83}$	$K_{91}$	$K_{92}$	$K_{93}$	$K_{01}$	$K_{02}$	$K_{03}$
	40- 55	55- 80	80- 100	0,0020- 0,0030	0,0030- 0,0060	0,0060- 0,0080	1,00- 1,07	1,07- 1,19	1,19- и >	до 0,79	0,79- 0,91	0,91- 0,99	<0,1	0,10- 0,20	0,20- 0,35
$D_1$	0,30	0,31	0,39	0,16	0,22	0,62	0,13	0,18	0,69	0,07	0,13	0,80	0,26	0,22	0,52
$D_2$	0,20	0,30	0,50	0,65	0,21	0,14	0,30	0,40	0,30	0,45	0,40	0,15	0,57	0,19	0,24
$P(K_j)$	0,26	0,30	0,43	0,34	0,21	0,44	0,18	0,26	0,54	0,21	0,23	0,56	0,37	0,21	0,41
$Z_{D1}$	0,20	0,04	-0,15	-1,09	0,07	0,49	-0,48	-0,53	0,34	-1,60	0,83	0,50	-0,51	0,05	0,34
$Z_{D2}$	-0,37	0	0,21	0,93	0	-1,44	0,73	0,62	-0,86	1,09	0,80	-1,94	0,62	-0,15	-0,78

признака  $K_j$ . Допустим в результате обследования системы «Т-Д» признак  $K_j$  имеет реализацию признака  $K_{jS}$ , то диагностический вес можно определить:

$$Z_{D_i}(K_{jS}) = \log_2 \frac{P(K_{jS} / D_i)}{P(K_{jS})}, \quad (1)$$

где  $P(K_{jS}/D_i)$  – вероятность попадания признака  $K_j$  в интервал «S» для системы «Т-Д» с состоянием  $D_i$ ;

$P(K_{jS})$  - вероятность появления этого интервала у всех объектов с различным техническим состоянием.

На момент обследования системы «Т-Д», по результатам статистических данных предыдущих исследований принимаем следующие вероятностные характеристики о значениях контролируемого признака  $K_j$ , например для амплитуды спектра колебаний давления жидкости (S), исправного  $D_1$  и неисправного  $D_2$ ,  $P(D_1)=0,63$  и  $P(D_2)=0,37$ . В большинстве случаев, область возможных значений измеряемого диагностического признака разбивается на интервалы, для нашего примера  $P(K_{j1})=0,17$ ;  $P(K_{j2})=0,27$ ;  $P(K_{j3})=0,55$ .

Диагностические веса для этого признака:

$$Z_{D_1}(K_{j1}) = \log_2 \frac{P(K_{j1} / D_1)}{P(K_{j1})} = \log_2 \frac{0,10}{0,17} = -0,7612$$

соответственно  $Z_{D_1}(K_{j2}) = -0,4344$ ;  $Z_{D_1}(K_{j3}) = -0,3448$ ;  
 $Z_{D_2}(K_{j1}) = 0,8155$ ;  $Z_{D_2}(K_{j2}) = 0,5655$ ;  $Z_{D_2}(K_{j3}) = -0,8889$ .

Диагностическая ценность обследования определяется:

$$Z_{D_i}(K_j) = \sum_{S=1}^3 P(K_{jS} / D_i) \cdot Z_{D_i}(K_{jS}) \quad (2)$$

Используя выражение (2) определим диагностическую ценность, вносимую всеми реализациями признаков –  $K_{jS}$  при обследовании системы «Т-Д» для состояний  $D_1$  и  $D_2$ :

$Z_{D_1}(S_1) = 0,0760$ ;	$Z_{D_2}(S_P) = 0,2000$ ;	$Z_{D_1}(v_P) = 0,0910$ ;
$Z_{D_2}(v_P) = 0,5670$ ;	$Z_{D_1}(\Phi_P) = 0,2708$ ;	$Z_{D_2}(\Phi_P) = 0,4885$ ;
$Z_{D_1}(Дж_P) = 0,1128$ ;	$Z_{D_2}(Дж_P) = 0,2519$ ;	$Z_{D_1}(V_P) = 0,1310$ ;
$Z_{D_2}(V_P) = 0,3347$ ;	$Z_{D_1}(S_G) = 0,0139$ ;	$Z_{D_2}(S_G) = 0,0310$ ;
$Z_{D_1}(v_G) = 0,1448$ ;	$Z_{D_2}(v_G) = 0,4029$ ;	$Z_{D_1}(\Phi_G) = 0,0768$ ;
$Z_{D_2}(\Phi_G) = 0,2090$ ;	$Z_{D_1}(Дж_G) = 0,1801$ ;	$Z_{D_2}(Дж_G) = 0,5195$ ;
$Z_{D_1}(V_G) = 0,0552$ ;	$Z_{D_2}(V_G) = 0,1377$ ;	

Как видно из вышеприведенных результатов, наибольшей диагностической ценностью при обследовании системы «Т-Д» обладают следующие признаки: энтропийный анализ ( $\Phi_P$ ) и число выбросов ( $v_P$ ) колебаний давления промывочной жидкости, а также коэффициент Джини ( $Дж_G$ ) колебаний осевой нагрузки.

Далее, рассмотрим конкретные примеры вероятностного подхода при распознавании технического состояния объектов управления в процессе эксплуатации.

**Пример 1.** Определить информативность каждого признака  $K_j$  при оценке технического состояния долота в случае, когда в качестве критерия принимается величина изменения амплитуды спектра колебаний давления промывочной жидкости (S).

При бурении скважин на кусте 769“б” Саматлорского месторождения было израсходовано порядка 100 долот, которые после обработки были осмотрены. Анализ показал, что 63 из них оказались в исправном состоянии ( $D_1$ ), а в остальных 37 долотах наблюдался повышенный износ вооружения и люфта опоры (состояние  $D_2$ ).

При диагностировании долота область возможных значений измеряемого критерия в большинстве случаев разбивается на интервалы, и характерным является наличие значения параметра в данном интервале. В связи с этим результат количественного определения измеряемого параметра может рассматриваться как признак, принимающий несколько возможных состояний.

Разделим диапазон изменения критерия ( $S$ ) на три участка:

$$S_{11} = 10-15с;$$

$$S_{12} = 15-30с;$$

$$S_{13} = 30-60с;$$

Результаты анализа технического состояния долот и данные по измерениям критерия ( $S$ ) представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Статистические данные по оценке технического состояния долота по критерию ( $S$ )

Амплитуда спектра колебаний давления, $S$ , с	Состояние системы измерений спектра колебаний давления	Состояние долота	
		Исправные, $D_1$	Повышенный износ, $D_2$
10-15	$S_1$	33	3
15-30	$S_2$	20	10
30-60	$S_3$	10	24

Вычисленные значения вероятностей  $P(D_i \cdot S_j)$ ,  $P(D_i)$ ,  $P(S_j)$  полученные по исходным данным сведем в таблицу 4.

Таблица 4 - Вероятностные характеристики оценки технического состояния долот

$D_i$	$S_j$			$P(D_i)$
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	
$D_1$	0,33	0,20	0,10	0,63
$D_2$	0,03	0,10	0,24	0,37
$P(S_j)$	0,36	0,30	0,34	-

Вычислим среднюю информацию о состоянии вооружения и опоры долота по результатам контроля спектра колебаний давления промывочной жидкости:

$$I_D(S) = \sum_{i=1}^2 \cdot \sum_{j=1}^3 P(D_i \cdot S_j) \cdot \log_2 \frac{P(D_i \cdot S_j)}{P(D_i) \cdot P(S_j)} = \frac{1}{\lg 2} [0,33 \cdot \lg \frac{0,33}{0,63 \cdot 0,36} +$$

$$+ 0,20 \cdot \lg \frac{0,20}{0,63 \cdot 0,39} + 0,10 \cdot \lg \frac{0,10}{0,63 \cdot 0,34} + 0,03 \cdot \lg \frac{0,03}{0,37 \cdot 0,36} + 0,10 \cdot \lg \frac{0,10}{0,37 \cdot 0,30} +$$

$$+ 0,24 \cdot \lg \frac{0,24}{0,37 \cdot 0,34}] = 0,218$$

Это значение свидетельствует о том, что критерий (S) спектр колебаний давления промывочной жидкости не полностью характеризует техническое состояние долота.

Далее найдем значение получаемой информации относительно исправного состояния долота по результатам измерения амплитуды спектра колебаний давления (S) с учетом того, что  $P(S_j/D_1) = P(D_1 \cdot S_j)/[P(D_1)]$ .

$$I_{D_1}(S) = \sum_{j=1}^3 P(S_j / D_1) \cdot \log_2 \frac{P(D_1 \cdot S_j)}{P(D_1) \cdot P(S_j)} = \frac{1}{\lg 2} \left[ \frac{0,33}{0,63} \cdot \lg \frac{0,33}{0,63 \cdot 0,36} + \frac{0,20}{0,63} \cdot \lg \frac{0,20}{0,63 \cdot 0,30} + \frac{0,10}{0,63} \lg \frac{0,10}{0,63 \cdot 0,34} \right] = 0,132$$

Информативность амплитуды спектра колебаний давления промывочной жидкости, как диагностического признака неисправного состояния долота:

$$I_{D_2}(S) = \sum_{j=1}^3 P(S_j / D_2) \cdot \log_2 \frac{P(D_{21} \cdot S_j)}{P(D_2) \cdot P(S_j)} = \frac{1}{\lg 2} \left[ \frac{0,03}{0,37} \cdot \lg \frac{0,03}{0,37 \cdot 0,36} + \frac{0,10}{0,37} \cdot \lg \frac{0,10}{0,37 \cdot 0,30} + \frac{0,24}{0,37} \lg \frac{0,24}{0,37 \cdot 0,34} \right] = 0,391$$

Далее оценим значение информации относительно технического состояния долота, если становится известным значение амплитуды спектра колебаний давления.

Если  $S_1 = 10 \dots 15$ с, то

$$I_D(S_1) = \sum_{i=1}^2 P(D_i / S_1) \cdot \log_2 \frac{P(D_i \cdot S_1)}{P(D_i) \cdot P(S_1)} = \frac{1}{\lg 2} \left[ \frac{0,33}{0,36} \cdot \lg \frac{0,33}{0,63 \cdot 0,36} + \frac{0,03}{0,36} \cdot \lg \frac{0,03}{0,37 \cdot 0,36} \right] = 0,284$$

Если  $S_2 = 15 \dots 30$ с, то

$$I_D(S_2) = \sum_{i=1}^2 P(D_i/S_2) \cdot \log_2 \frac{P(D_i \cdot S_2)}{P(D_i) \cdot P(S_2)} = \frac{1}{\lg 2} \left[ \frac{0,20}{0,30} \cdot \lg \frac{0,20}{0,63 \cdot 0,30} + \right. \\ \left. + \frac{0,10}{0,30} \cdot \lg \frac{0,10}{0,37 \cdot 0,30} \right] = 0,046$$

Если  $S_3 = 30 \dots 60$ с, то

$$I_D(S_3) = \sum_{i=1}^2 P(D_i/S_3) \cdot \log_2 \frac{P(D_i \cdot S_3)}{P(D_i) \cdot P(S_3)} = \frac{1}{\lg 2} \left[ \frac{0,10}{0,34} \cdot \lg \frac{0,10}{0,63 \cdot 0,34} + \right. \\ \left. + \frac{0,24}{0,34} \cdot \lg \frac{0,24}{0,37 \cdot 0,34} \right] = 0,965$$

Таким образом, наибольшей информацией о состоянии объекта управления можно обладать, когда значение амплитуды спектра колебаний давления промысловочной жидкости будет  $S=30 \dots 60$ с.

Количество информации, получаемой при измерении амплитуды спектра колебаний давления жидкости относительно неисправного состояния долота:

Если  $S_1 = 10 \dots 15$ с, то

$$I_{D_2}(S_1) = \frac{1}{\lg 2} \lg \frac{0,03}{0,36 \cdot 0,37} = -2,098;$$

Если  $S_2 = 15 \dots 30$ с, то

$$I_{D_2}(S_2) = \frac{1}{\lg 2} \lg \frac{0,10}{0,30 \cdot 0,37} = -1,149;$$

Если  $S_3 = 30 \dots 60$ с, то

$$I_{D_2}(S_3) = \frac{1}{\lg 2} \lg \frac{0,24}{0,34 \cdot 0,37} = 0,928$$

Анализ полученных результатов показывает, что при получении результатов критерия диагностирования  $S_1=10 \dots 15$ с, можно с большой уверенностью утверждать, что долото не может находиться в неисправном состоянии.

**Пример 2.** Оценить техническое состояние долота в процессе бурения скважины. В качестве критериев диагностирования выбраны следующие показатели:  $\Phi_p$  – энтропийный анализ колебаний давления жидкости за некоторый установленный уровень,  $D_{жГ}$  – коэффициент Джини колебаний осевой нагрузки на долото. Эти критерии были определены, как наиболее информативные на основании результатов предыдущих исследований.

Предположим, что долото может находиться в одном из следующих состояний:  $D_1$  – долото исправное, новое скол зубков вооружения «С»= 10%, люфт опор долота «П» до 1мм;  $D_2$  – скол зубков «С»=10-40%, люфт до 2 мм;  $D_3$  – скол

«С» = 40-60%, люфт «П» до 3 мм; D<sub>4</sub> – скол «С»= 60-80%, люфт «П» до 4мм; D<sub>5</sub> – скол «С»>80%, люфт «П»>4мм, предаварийное состояние долота.

Имеющиеся статистические данные по обобщению опыта эксплуатации долот при бурении скважин на Саматлоровском месторождении позволили получить априорные вероятности P(D<sub>i</sub>) и P(K<sub>j</sub>/D<sub>i</sub>), результаты которого в виде диагностической матрицы представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Варианты диагностической матрицы Байеса при оценке технического состояния долота

D <sub>i</sub>	P(Φ/D <sub>i</sub> )	P(v/D <sub>i</sub> )	P(Дж/D <sub>i</sub> )	P(D <sub>i</sub> )
D <sub>1</sub>	0	0,10	0	0,67
D <sub>2</sub>	0	0,49	0,22	0,06
D <sub>3</sub>	0,54	0,34	0,26	0,12
D <sub>4</sub>	0,81	0	0	0,10
D <sub>5</sub>		0	0,52	0,05

При контроле за работой долота возможны следующие сочетания проявления диагностических признаков: Φ, v, Дж; Φ и v; Φ и Дж; v и Дж; только Φ; только v; только Дж.

Определим вероятность нахождения долота в исправном состоянии, если имеет место одно из возможных проявлений признаков Φ, v, Дж диагностического вектора K\*. Также необходимо принять во внимание то обстоятельство, что отсутствие признака K<sub>j</sub> есть признак наличия  $\bar{K}_j$  (противоположное событие), причем P( $\bar{K}_j$ /D<sub>i</sub>)=1-P(K<sub>j</sub>/D<sub>i</sub>).

$$P(D_1 / \Phi v Дж) = \frac{P(D_1) \cdot P(\Phi / D_1) \cdot P(v / D_1) \cdot P(Дж / D_1)}{\sum_{i=1}^5 P(D_i) \cdot P(K^* / D_i)} = 0$$

так как P(Φ/D<sub>1</sub>) и P(Дж/D<sub>1</sub>) равны нулю.

По той же причине

$$P(D_1 / \Phi v \bar{Дж}) = P(D_1 / \Phi \bar{v} Дж) = P(D_1 / \bar{\Phi} v Дж) = P(D_1 / \Phi \bar{v} \bar{Дж}) = P(D_1 / \bar{\Phi} \bar{v} Дж) = 0;$$

$$P(D_1 / \bar{\Phi} v \bar{Дж}) = \frac{P(D_1) \cdot P(D_1 / \bar{\Phi}) \cdot P(D_1 / v) \cdot P(D_1 / \bar{Дж})}{\sum_{i=1}^5 P(D_i) \cdot P(K^* / D_i)} =$$

$$= \frac{0,67 \cdot 1,0 \cdot 0,1 \cdot 1,0}{(0,67 \cdot 1,0 \cdot 0,1 \cdot 1,0) + (0,06 \cdot 1,0 \cdot 0,49 \cdot 0,78) + (0,12 \cdot 0,46 \cdot 0,34 \cdot 0,74)} = 0,644$$

Результаты расчетов вероятностей различных состояний долот при проявлении выбранных диагностических признаков приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Вероятности возникновения различных состояний долот

Реализация признаков	Вероятность классификации состояний				
	P(D <sub>1</sub> /K*)	P(D <sub>2</sub> /K*)	P(D <sub>3</sub> /K*)	P(D <sub>4</sub> /K*)	P(D <sub>5</sub> /K*)
Φ, v и Дж	0	0	1,0	0	0
Φ и v	0	0	1,0	0	0
Φ и Дж	0	0	0,484	0	0,516

$v$ и Дж	0	0,560	0,440	0	0
Только - $\Phi$	0	0	0,245	0,630	0,125
Только - $v$	0,644	0,221	0,135	0	0
Только - Дж	0	0,275	0,392	0	0,333

Анализ полученных результатов показывает, что если контроль состояния долота в процессе эксплуатации осуществлять одновременно сразу по трем диагностическим признакам измеряемых на устье:  $\Phi$ ,  $v$  и Дж или только по двум из них  $\Phi$  и  $v$ , то в этом случае можно определить состояние долота при износе вооружения 40-60% и люфте опоры 3 мм. Если контроль состояния долота вести только по признакам  $\Phi$  и Дж, то с вероятностью  $P(D_5/K^*) = 0,516$  можно прогнозировать его предаварийное состояние. О работоспособности состояния долота ( $D_1$ ) можно говорить с вероятностью  $P(D_1/A^*)=0,644$  при анализе признака ( $v$ ).

Если задаться уровнем (достоверностью) диагноза  $P_D = 0,9$ , то можно сделать заключение, что выбранная совокупность диагностических признаков для оценки технического состояния долота в процессе эксплуатации не является оптимальной, так как позволяет с необходимой достоверностью определить только средний износ ( $D_3$ ) долота. А для получения более достоверных сведений о наступлении предаварийного состояния долота ( $D_5$ ) необходимо использование дополнительных диагностических признаков, которые были рассмотрены ранее и обладали меньшей информативностью и приведены в таблицах 1, 2.

#### Литература

1. Савчук В.П. Байесовские методы статистического оценивания. – М.: Наука, 1989. – 317с.
2. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. – М.: Высш. шк., 1984. – 208с.
3. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1980. – 263с.
4. Бергер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение 1978. – 240с.