

**Н.Н. ФАТЕЕВА**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА БАЙЕСА В ДИАГНОСТИКЕ ГИДРОПНЕВМОАГРЕГАТОВ**

Применение в диагностике гидропневмоагрегатов статистических методов распознавания позволяет одновременно учитывать признаки различной физической природы, так как они характеризуются безразмерными величинами – вероятностями их появления при различных состояниях системы. Рассмотрено применение метода Байеса на конкретном примере (выбор основного диагностического параметра аксиально-поршневого насоса) с использованием программных средств, что помогает существенно упростить порядок расчета и сократить время на его выполнение.

**Ключевые слова:** техническая диагностика, метод Байеса, диагностическая матрица, комплекс признаков, гидропневмоагрегат.

**Введение.** Гидропневмоагрегаты становятся неотъемлемой частью современной подъемно-транспортной, строительной, сельскохозяйственной и другой техники. Применение гидропневмоагрегатов (ГПА) упрощает процессы автоматизации, унификации, облегчает труд оператора, раскрывает широкие возможности для повышения надежности машин. Средством повышения качества и эффективности технического обслуживания, ремонта и эксплуатации ГПА является техническая диагностика. Она повышает культуру технической эксплуатации ГПА, его надежность, обеспечивает достоверное прогнозирование остаточного ресурса, что важно для нормальной эксплуатации машин и планирования их работ [1]. Среди методов технической диагностики ГПА метод, основанный на *обобщенной формуле Байеса*, занимает особое место благодаря простоте и эффективности. Байесовский подход открывает новые, довольно широкие возможности применения методов математического моделирования, а разработанные алгоритмы оценивания на основе генерирования случайных чисел способствуют решению поставленных задач с помощью современных вычислительных процедур [2].

**Анализ последних исследований.** В настоящий момент актуальной задачей оценивания математических и статистических моделей является применение байесовской методологии к процессам различной природы. Байесовская методология исследовалась во многих работах и использовалась в разных областях науки и техники. В частности, *А. Зельнер* исследовал использование таких методов в эконометрике [3]; *В. П. Савчук* анализировал надежность технических объектов [4]; *Г. И. Зайончковский* исследовал диагностику гидравлических систем воздушных судов [5]; известно также много других направлений применения этих методов. Использование байесовской

методологии зачастую сводилось к большим аналитическим исследованиям, которые иногда требовали основательных знаний математики и статистики [6]. Благодаря развитию компьютерной техники и применению программных средств появилась возможность существенно упростить порядок расчета и сократить время на его выполнение.

Учитывая изложенное выше, применение метода Байеса в диагностике ГПА является актуальной и интересной научной задачей.

**Постановка задачи.** Задача ставится следующим образом. Известна система, которая находится в одном из  $N$  случайных состояний. Известна совокупность признаков, каждый из которых с определенной вероятностью характеризует состояние системы. Требуется построить решающее правило, с помощью которого предъявленная совокупность признаков  $K(K_1, K_2, \dots, K_m)$  может быть отнесена к одному из возможных состояний (диагнозов)  $D_i$ . Кроме этого, необходимо определить достоверность принятого решения. Так как поставленная задача является вероятностной, то применяется метод Байеса [7].

**Математическая модель.** Выбирают основные параметры состояния узла и параметры их проявления (выходные), которые могут использоваться в качестве диагностических. Параметрами состояния могут быть показатели износа, потеря упругих свойств (пружины), обрыв или потеря эластичности (резиновые уплотнения) и т. д.

По данным статистики отказов определяют *вероятностные веса* признаков при различных состояниях, затем определяют вероятности состояний объектов при различных комбинациях признаков.

Вероятности состояний определяют по формуле Байеса

$$P(D_i / K) = \frac{P(D_i) \cdot P(K_1 / D_i) \cdot \dots \cdot P(K_m / D_i)}{\sum_{i=1}^n P(D_i) \cdot P(K_1 / D_i) \cdot \dots \cdot P(K_m / D_i)}, \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (1)$$

где  $P(D_i)$  – априорная вероятность состояния объекта;  $D_1, \dots, D_n$  – состояния объекта;  $K_1, \dots, K_m$  – признаки (параметры) состояний объекта;  $P(K_1 / D_i), \dots, P(K_m / D_i)$  – вероятности проявления признаков  $K_1, \dots, K_m$  при состоянии  $D_i$ .

Априорную вероятность состояний в простейшем случае, когда состояния  $D_1, D_2, \dots, D_n$  образуют полную группу несовместимых событий, определяют как отношение числа объектов  $N_i$ , в которых обнаружены неисправности  $D_i$ , к общему числу исследуемых объектов  $N$ :

$$P(D_i) = \frac{N_i}{N}. \quad (2)$$

В знаменателе формулы (1) представлена вероятность  $P(K)$  того, что в исследуемом ГПА должен обнаруживаться комплекс признаков  $K$ . Так как комплекс признаков  $K$  всегда проявляется как минимум с одним из состояний  $D_i$ , то полная вероятность

$$P(K) = \sum_1^n P(D_i) \cdot P(K / D_i). \quad (3)$$

Представленное в формуле (1) произведение  $P(K_1 / D_i), \dots, P(K_m / D_i)$  представляет собой  $P(K / D_i)$  при условии, что сумма вероятностей

$$\sum_{i=1}^n P(D_i / K) = 1$$

и признаки  $K_j$  являются независимыми для каждого из состояний  $D_i$ .

В случае отсутствия признака  $K_j$

$$P(\bar{K}_j / D_i) = 1 - P(K_j / D_i). \quad (4)$$

Решение о диагнозе, то есть отнесение состояния ГПА к одному из  $D_i$ , может быть принято, если

$$P(D_i / K) \geq P_0,$$

где  $P_0$  – заранее выбранный уровень диагноза (заданная надежность диагностирования). Для современных систем диагностирования ГПА  $P_0 = 0,8 \div 0,9$ . При  $P(D_i / K) < P_0$  решение о диагнозе не принимается, и требуются дополнительные исследования.

**Метод расчета.** Для определения вероятности диагнозов по методу Байеса необходимо составить *диагностическую матрицу*, которая формируется на основе предварительного статистического материала. В этой таблице содержатся вероятности разрядов признаков при различных диагнозах. Размер исследуемых значений определяется количеством вероятных (возможных) проявлений признаков отказов и неисправных состояний [8].

Рассмотрим в качестве примера выбор основного диагностического параметра аксиально-поршневого насоса НПА-64.

Выбираются девять основных состояний насоса  $D_i$  и четыре основных диагностических признака (параметра)  $K_j$  проявления различных неисправностей, которые сводятся к повышенным параметрам вибрации корпуса насоса  $K_1$ , повышенным пульсациям давления в напорной гидролинии  $K_2$ , снижению объемного КПД  $K_3$  и течи рабочей жидкости из штуцера дренажной линии  $K_4$ .

Диагностическая матрица Байеса об отказах и неисправностях аксиально-поршневого насоса приведена ниже в табл. 1.

Таблица 1. Диагностическая матрица Байеса

Состояние насосов $D_i$	Признаки $K_i$				
	$P(K_1 / D_i)$	$P(K_2 / D_i)$	$P(K_3 / D_i)$	$P(K_4 / D_i)$	$P(D_i)$
Суммарный износ торцового гидрораспределителя и торцовой поверхности блока цилиндра – $D_1$	0,79	0,82	0,99	0,8	0,7
Суммарный осевой люфт в сочленении поршень-шатун-вал – $D_2$	0,75	0,98	0,08	0,02	0,65
Радиальный зазор поршень-отверстие блока цилиндров – $D_3$	0,56	0,6	0,93	1	0,4
Износ подшипников – $D_4$	0,99	0,1	0,2	0,12	0,18
Износ шеек кардана – $D_5$	0,9	0,15	0	0	0,01
Износ подпятника кардана – $D_6$	0,84	0	0	0	0,03
Износ или разрушение деталей уплотнения приводного вала – $D_7$	0	0	0,01	0	0,05
Потеря упругих свойств (поломка) пружины – $D_8$	0	0	0,1	0	0,002
Исправное состояние насоса – $D_9$	0,03	0,02	0	0	0,3

При работе диагностируемого объекта возможны следующие сочетания проявления признаков  $K_j$ :  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  и  $K_4$ ; только  $K_1$ ; только  $K_2$ ; только  $K_3$ ; только  $K_4$ ;  $K_1$  и  $K_2$ ;  $K_3$  и  $K_4$ ;  $K_2$  и  $K_3$ ;  $K_2$  и  $K_4$ ;  $K_1$  и  $K_3$ ;  $K_1$  и  $K_4$ ;  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$ ;  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_4$ ;  $K_1$ ,  $K_3$  и  $K_4$ ;  $K_2$ ,  $K_3$  и  $K_4$ .

Определим вероятность нахождения насоса в исправном состоянии, если имеет место одно из возможных проявлений признаков  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  и  $K_4$ . По формуле (1) получим вероятность

$$P(D_9 / K_1 K_2 K_3 K_4) = \frac{P(D_9) \cdot P(K_1 / D_9) \cdot P(K_2 / D_9) \cdot P(K_3 / D_9) \cdot P(K_4 / D_9)}{\sum_{i=1}^9 P(D_i) \cdot P(K_1 / D_i) \cdot \dots \cdot P(K_m / D_i)} = 0,$$

поскольку  $P(K_3 / D_9)$  и  $P(K_4 / D_9)$  равны 0.

Из вышеприведенного ясно, что метод Байеса сложен для выполнения расчетов, поскольку использует много переменных, учитывающих различные факторы. Поэтому его избегают, редко применяют в практической деятель-

ности.

Применение программных средств помогает существенно упростить порядок расчета и сократить время на его выполнение.

Расчет на основе метода Байеса вероятностей состояний исследуемых объектов (любых объектов) при разных комбинациях признаков  $K_j$  может быть с успехом выполнен как в среде программного обеспечения MathCad, так и в среде программного обеспечения Microsoft Excel.

**Анализ полученных результатов.** Результаты расчетов вероятностей различных состояний насосов при проявлении выбранных диагностических признаков получены в среде программного обеспечения Microsoft Excel и приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчетов

Реализация признаков	Вероятность классификации состояний								
	$P(D_1/K)$	$P(D_2/K)$	$P(D_3/K)$	$P(D_4/K)$	$P(D_5/K)$	$P(D_6/K)$	$P(D_7/K)$	$P(D_8/K)$	$P(D_9/K)$
$K_1, K_2, K_3, K_4$	0,74	0,0016	0,258	0,0009	0	0	0	0	0
только $K_1$	0,0012	0,054	0	0,69	0,047	0,154	0	0	0,054
только $K_2$	0,0016	0,958	0	0,0008	0,001	0	0	0	0,039
только $K_3$	0,809	0,039	0	0,044	0	0	0,077	0,0309	0
только $K_4$	0,0395	0,0112	0,92	0,029	0	0	0	0	0
$K_1$ и $K_2$	0,002	0,966	0	0,028	0,003	0	0	0	0,0004
$K_3$ и $K_4$	0,242	$6 \cdot 10^{-5}$	0,757	0,0004	0	0	0	0	0
$K_2$ и $K_3$	0,656	0,343	0	0,0009	0	0	0	0	0
$K_2$ и $K_4$	0,0853	0,259	0,654	0,0015	0	0	0	0	0
$K_1$ и $K_3$	0,405	0,0157	0	0,5796	0	0	0	0	0
$K_1$ и $K_4$	0,035	0,0079	0,277	0,68	0	0	0	0	0
$K_1, K_2$ и $K_3$	0,689	0,287	0	0,024	0	0	0	0	0
$K_1, K_2$ и $K_4$	0,154	0,373	0,399	0,073	0	0	0	0	0
$K_1, K_3$ и $K_4$	0,475	0,0001	0,502	0,023	0	0	0	0	0
$K_2, K_3$ и $K_4$	0,492	0,0013	0,506	$2 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0

Если задать уровень (достоверность) диагноза  $P_0 = 0,8 \div 0,9$ , то анализ полученных данных показывает, что когда появляется признак  $K_2$  или два при-

знака  $K_1$  и  $K_2$ , то в насосе имеет место состояние  $D_2$  – суммарный осевой люфт в сочленении поршень-шатун-вал, а если появляется признак  $K_3$ , то в насосе имеет место состояние  $D_1$  – суммарный износ торцового гидрораспределителя и торцовой поверхности блока цилиндра.

Из приведенных расчетов следует, что диагностирование аксиально-поршневых насосов НПА-64 можно проводить по величине изменения трех основных признаков (параметров): объемному КПД, пульсациям давления в напорной гидролинии, вибрациям корпуса насоса. В связи с тем, что более 98% насосов выбраковываются и поступают в ремонт по причине снижения объемного КПД и в значительной меньшей степени по причине повышенных пульсаций давления и вибраций корпуса насоса, показатель объемного КПД принимается за основной.

**Перспективы дальнейших исследований.** Автор считает перспективным направление исследования вопросов технической диагностики ГПА, так как диагностирование создает условия для значительного повышения коэффициента использования машин благодаря сокращению времени на их техническое обслуживание и ремонт, уменьшения затрат на эксплуатацию и исключения аварийных ситуаций.

**Выводы.** Благодаря применению статистических методов распознавания можно одновременно учитывать признаки различной физической природы, так как они характеризуются безразмерными величинами – вероятностями их появления при различных состояниях системы. Использование метода Байеса при оценке технического состояния ГПА дает возможность с достаточной точностью судить о текущем состоянии оборудования и прогнозировать ремонтные мероприятия. Разумеется, метод Байеса имеет недостатки: большой объем предварительной информации, «угнетение» редко встречающихся диагнозов и др. Однако в случаях, когда объем статистических данных позволяет применить метод Байеса, его целесообразно использовать как один из наиболее надежных и эффективных методов.

**Список литературы:** 1. Харазов А.М. Техническая диагностика гидроприводов машин. – М.: Машиностроение, 1979. – 112 с. 2. Бидюк П.И., Павлов В.В., Борисевич А.С., Гасанова Л.Т. Оценка регрессионных моделей с помощью метода Монте-Карло для марковских цепей // Кибернетика и вычислительная техника. – 2009. – №156. – С. 40 – 57. 3. Зельнер А. Байесовские методы в эконометрии. – М.: Статистика, 1980. – 434 с. 4. Савчук В.П. Байесовские методы статистического оценивания: Надежность технических объектов. – М.: Наука, 1989. – 328 с. 5. Надежность гидравлических систем воздушных судов / Под ред. Т.М. Башты – М.: Транспорт, 1986. – 279 с. 6. Справочник по прикладной статистике / Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана – М.: Финансы и статистика, 1989. – 525 с. 7. Сырицын Т.А. Эксплуатация и надежность гидро- и пневмоприводов. – М.: Машиностроение, 1990. – 248 с. 8. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

Надійшла до редколегії 20.02.2013

---

УДК 621.225

**Применение метода Байеса в диагностике гидропневмоагрегатов / Н. Н. Фатеева // Вісник НТУ «ХП». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХП», 2013. – №37 (1010). – С. 200 – 206. Бібліогр.: 8 назв.**

Використання в діагностиці гідро-пневмоагрегатів статистичних методів розпізнавання дозволяє одночасно враховувати ознаки різної фізичної природи, оскільки вони характеризуються безрозмірними величинами – вірогідністю їх появи при різних станах системи. Розглянуто вживання методу Байеса на конкретному прикладі (вибір основного діагностичного параметра аксіально-поршневого насоса) з використанням програмних засобів, що допомагає істотно спростити порядок розрахунку і скоротити час на його виконання.

**Ключові слова:** технічна діагностика, метод Байеса, діагностична матриця, комплекс ознак, гидропневмоагрегат.

Application in diagnostics of hydropneumounits of statistical methods of recognition allows simultaneously to take into account the signs of different physical nature, because they are characterized dimensionless sizes – probabilities of their appearance at the different states of the system. Application of method of Bayes is considered on a concrete example (choice of basic diagnostic parameter of axial-plunger pump) with the use of programmatic facilities, that helps substantially to simplify the order of calculation and shorten time on his implementation.

**Key words:** technical diagnostics, method of Bayes, diagnostic matrix, complex of signs, hydropneumounit.

УДК 621.224

**О.Н. ХОРЕВ**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИПМаш НАН Украины,  
Харьков

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ НАСОС-ТУРБИНЫ**

Представлены результаты численного исследования течения вязкой жидкости в проточной части радиально-осевой насос-турбины Днестровской ГАЭС при напоре 150 м. Расчеты проведены с помощью программного комплекса FlowER-U. Показана структура потока, выполнен анализ особенностей физических процессов и определены потери энергии в элементах проточной части в турбинном и насосном режимах. Проведено сравнение полученных результатов с данными экспериментальных исследований на гидродинамическом стенде.

**Ключевые слова:** проточная часть, насос-турбина, рабочее колесо, вязкое течение, численное моделирование.

**Введение.** В энергетических системах развитых стран доля мощностей ГЭС и ГАЭС составляет минимум 15 % от суммарной мощности генерирующих источников энергии. В балансе энергосистемы Украины доля гидроэлектростанций по состоянию на начало 2012 г. не превышала 10,2 %. Сложившаяся ситуация характеризуется крайне неоптимальной структурой гене-

---

© О. Н. Хорев, 2013