

УДК 631.371:338.43

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА БАЙЕСА ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ДЕФЕКТОВ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ПО ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ ДИЗЕЛЯ**

**Д. В. КИРДИЩЕВ**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный аграрный университет»,  
Российская Федерация*

*Применение виброакустического компьютерного измерительного комплекса позволяет во время работы дизельного двигателя получить спектры вибрации в диапазоне от 5 до 500 Гц топливной аппаратуры при различных режимах работы. В статье рассматриваются практические результаты технического диагностирования топливных форсунок с использованием виброакустических характеристик. На основе заданной диагностической матрицы и метода Байеса выполнены расчеты по определению влияния засорения сопел форсунки и износа топливного насоса на эффективность работы топливных форсунок дизельного двигателя. Изложена методика технического диагностирования топливных форсунок дизелей по спектрам вибрации. Представлен принцип работы компьютерного виброакустического измерительного комплекса. Приведен способ расшифровки спектров вибрации форсунок во время работы дизеля. При выверенной статистике дефектов и их признаков метод Байеса обеспечивает высокую достоверность во время диагностирования и прогнозирования технического состояния различного оборудования.*

**Ключевые слова:** дизель, форсунка, амплитуда, частота вибрации, метод Байеса.

## **APPLICATION OF THE BAYES METHOD FOR DETECTING DEFECTS IN FUEL EQUIPMENT BY VIBROACOUSTIC CHARACTERISTICS DURING THE OPERATION OF A DIESEL ENGINE**

**D. V. KIRDISHEV**

*Federal state budget educational enterprise of higher education "Bryansk State Agrarian University",  
Russian Federation*

*Application of the vibroacoustic computer measuring complex allows to obtain vibration spectra in the range from 5 to 500 Hz of the fuel equipment during the operation of the diesel engine under different modes of operation. The article discusses the practical results of technical diagnosis of fuel injectors using vibroacoustic characteristics. The author has carried out the calculations based on the given diagnostic matrix and Bayes method to determine the effect of injector's nozzle clogging and fuel pump wear on the efficiency of diesel fuel injectors. The technique of technical diagnostics of diesel fuel injectors by vibration spectra is described. The article presents the principle of operation of the computer vibroacoustic measuring complex. The principle of operation of the computer vibroacoustic measuring complex is presented. A method for deciphering injector vibration spectra during diesel operation is given. With verified statistics of defects and their indicators, the Bayes method provides high reliability during diagnosis and prediction of the technical condition of various equipment.*

**Keywords:** diesel, nozzle, amplitude, vibration frequency, Bayes method.

### **Введение**

Топливная аппаратура дизельного двигателя представляет собой сложный узел, в состав которого входит множество прецизионных элементов с точно притертыми поверхностями, работающих в условиях с высокими механическими, гидродинамическими и тепловыми нагрузками. Низкий уровень технического обслуживания топливной аппаратуры приводит к большим потерям дизельного топлива [1].

Сокращение поставок техники привело к значительному старению машинно-тракторного парка. В настоящее время 5 лет и менее эксплуатируются: 23 % тракторов, 29 % зерноуборочных и 35 % кормоуборочных комбайнов. Сверх амортизационного периода задействовано более 20 % сельскохозяйственной техники. Анализ состояния эксплуатации техники аграрно-промышленного комплекса показывает, что тракторы, сельскохозяйственные машины эксплуатируются на несоответствующем уровне, что приводит к снижению их эффективности. Минимальная ежегодная потребность в Республике Беларусь составляет 300 тракторов, 600 зерноуборочных комбайнов и 300 кормоуборочных. При этом следует отметить, что оптимальный срок службы трактора составляет 6–7 лет. После чего затраты на его эксплуатацию резко увеличиваются (требуется больше запчастей, увеличивается расход горючего, может снижаться сезонная выработка). По этой причине весьма актуальным является решение задач повышения долговечности и безотказности сельскохозяйственной техники на основе компьютерных технологий и технической диагностики.

Цель работы – оценка эффективности использования метода Байеса при решении задач технического диагностирования топливной аппаратуры на основе статистических данных по дефектам топливных форсунок.

### **Основная часть**

Средством, повышающим качество и эффективность технического обслуживания, ремонта и эксплуатации топливной аппаратуры, является техническая диагностика. Техническая диагностика, обеспечивая достоверное прогнозирование остаточного ресурса, повышает надежность топливной аппаратуры, что необходимо для нормальной эксплуатации дизеля и планирования его работы.

В работе [2] излагается метод диагностирования дизельных двигателей не только с применением органолептических способов (шум, лупа, цвет выхлопных газов), но и при помощи соответствующих измерительных приборов того времени. В 2016 г. по заказу Министерства сельского хозяйства Российской Федерации выполнялась НИР «Повышение эффективности технической эксплуатации автомобилей и тракторов в аграрном секторе Российской Федерации за счет совершенствования системы диагностирования». На основе большого экспериментального материала была показана возможность применения виброакустических характеристик для диагностирования форсунок и топливного насоса во время работы дизеля. Для измерения виброакустических характеристик применялся компьютерный виброакустический измерительный комплекс (рис. 1), который является совместной разработкой специалистов ГГТУ им. П. О. Сухого и БГУ.

Датчик виброускорения при помощи магнита крепился по очереди к форсункам дизеля во время его работы. Сигнал с вибродатчика через усилитель заряда поступает в компьютер. После записи и преобразования Фурье на экране компьютера в координатах «амплитуда (дБ) – вибрация (Гц)» изображается виброакустический сигнал во время работы форсунки (рис. 2).



Рис. 1. Инженер по ремонту двигателей измеряет вибрацию на форсунках двигателя Д-243:  
1 – персональный компьютер; 2 – усилитель заряда;  
3 – место установки вибродатчика

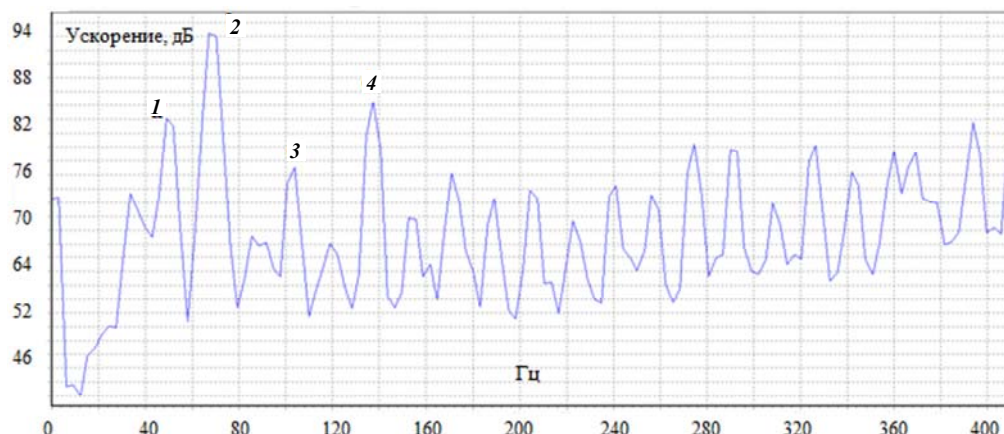


Рис. 2. Спектр вибрации форсунок при работе двигателя на 2000 об./мин, 8425 моточасов:  
1 – 48 Гц; 2 – 67 Гц; 3 – 103 Гц; 4 – 137 Гц

Дальнейшее развитие теории вибродиагностирования топливной аппаратуры изложено в статьях [3]–[5]. В статье [6] приводится построение диагностической модели форсунок и топливного насоса по результатам изменения виброакустических характеристик в зависимости от их технического состояния. Некоторые российские ученые считают, что по виброакустическим характеристикам можно выявить около 80 % дефектов дизельных двигателей [7]. Проведенные экспериментальные исследования показали, что по спектрам вибрации можно определить не только дефекты топливной аппаратуры, но и износ узлов, газораспределительной системы, цилиндропоршневой группы и подшипников скольжения коленчатого вала. Научная новизна выполненных исследований подтверждена патентом РФ на «Способ определения технического состояния форсунок на работающем двигателе» № 2667738 от 24 сентября 2018 г. RU 2667738 C2 [8]. В настоящее время актуальной задачей является разработка алгоритмов анализа спектров вибрации для выявления степени износа топливной аппаратуры.

**Результаты исследований.** Для выявления дефектов используются как детерминированные, так и вероятностно-статистические методы принятия решения, суть которых заключается в применении вероятностных моделей на основе оценивания и проверки гипотез при помощи выборочных характеристик [9].

Основное преимущество вероятностно-статистических методов распознавания состоит в возможности одновременного учета признаков различной физической природы или механизмов формирования, так как эти методы оперируют безразмерными величинами – вероятностями их появления при возникновении различных состояний системы.

Среди методов технической диагностики топливной аппаратуры 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 [10]. На практике используются следующие статистические методы распознавания ситуации: метод Байеса и метод последовательного анализа. В работе [11] применяются два метода: классификация дефектов по бинарным признакам; классификация ситуаций на основе теории нечетких множеств.

**Метод Байеса.** Метод основан на следующем подходе: если имеется диагноз  $D_i$  и простой признак  $X^*$ , встречающийся при этом диагнозе, то вероятность совместного появления события выражается таким образом:

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

При этом сумма вероятностей всех возможных реализаций признака равна единице.

Процесс обучения в методе Байеса состоит в формировании диагностической матрицы. Диагностическая матрица хранится в базе знаний экспертной системы. 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 ранжирования оператор проводит плановое диагностирование механизмов при помощи других методов [11].

Для определения вероятности диагнозов по методу Байеса необходимо составить диагностическую матрицу топливной аппаратуры, которая формируется на основе предварительного статистического материала, полученного при анализе вибродиагностических спектров.

На рис. 2 импульс  $d$  на частоте 137 Гц возникает при поступлении топлива в форсунку. Амплитуда на данной частоте зависит от технического состояния топливного насоса. В новом топливном насосе этот сигнал будет максимальным. Импульс  $c$  на частоте 103 Гц возникает при подъеме иглы в форсунке. Чем больше изношена пружина в форсунке, тем больше значение амплитуды. Импульс  $b$  соответствует детонации топлива после поступления топлива в цилиндр. Величина амплитуды сигнала зависит от количества топлива и качества его распыления. Импульс  $a$  на частоте 48 Гц возникает после опускания иглы. Амплитуда сигнала зависит от степени износа пружины. Чем больше износ пружины, тем меньше амплитуда сигнала. Учитывая, что  $T = 1/f$ , можно вычислить время появления данных сигналов.

## Диагностическая матрица топливной аппаратуры в методе Байеса

Диагноз $D_i$ топливной аппаратуры	Признак				$P(D_i)$
	Опускание иглы, частота 47–52 Гц, $x_1$	Детонация, заккоксованность сопел форсунки, частота 60–73 Гц, $x_2$	Подъем иглы, частота 98–115 Гц, $x_3$	Поступление топлива в форсунку, частота 137 Гц, $x_4$	
	$P(x_1/D_i)$	$P(x_2/D_i)$	$P(x_3/D_i)$	$P(x_4/D_i)$	
$D_1$	0,4	0,375	0,5	0,125	0,33
$D_2$	0,3	0,375	0,14	0,75	0,24
$D_3$	0,3	0,4	0,14	0,5	0,27
$D_4$	0,1	0,125	0,42	0,75	0,16

Из таблицы следует, что вероятность повреждения первой форсунки  $D_1$  составляет 0,33. Вероятность повреждения четвертой форсунки  $D_4$  составляет 0,16. Применяя обобщенную формулу Байеса и численные значения таблицы, определим, в какой степени дефект  $x_2$  (заккоксованность форсунки) влияет на эффективность работы всех четырех форсунок:

$$P(D_1 / x_2 \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{x}_4) = \frac{P(D_1)P(x_2 / D_1)P(\bar{x}_1 / D_1)P(\bar{x}_3 / D_1)P(\bar{x}_4 / D_1)}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4};$$

$$A_1 = P(D_1)P\left(\frac{x_2}{D_1}\right)P\left(\frac{\bar{x}_1}{D_1}\right)P\left(\frac{\bar{x}_3}{D_1}\right)P\left(\frac{\bar{x}_4}{D_1}\right);$$

$$A_1 = 0,33 \cdot 0,375 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 0,875 = 0,032;$$

$$A_2 = P(D_2)P\left(\frac{x_2}{D_2}\right)P\left(\frac{\bar{x}_1}{D_2}\right)P\left(\frac{\bar{x}_3}{D_2}\right)P\left(\frac{\bar{x}_4}{D_2}\right);$$

$$A_2 = 0,24 \cdot 0,375 \cdot 0,7 \cdot 0,86 \cdot 0,25 = 0,014;$$

$$A_3 = P(D_3)P\left(\frac{x_2}{D_3}\right)P\left(\frac{\bar{x}_1}{D_3}\right)P\left(\frac{\bar{x}_3}{D_3}\right)P\left(\frac{\bar{x}_4}{D_3}\right);$$

$$A_3 = 0,27 \cdot 0,4 \cdot 0,7 \cdot 0,86 \cdot 0,5 = 0,035;$$

$$A_4 = P(D_4)P\left(\frac{x_2}{D_4}\right)P\left(\frac{\bar{x}_1}{D_4}\right)P\left(\frac{\bar{x}_3}{D_4}\right)P\left(\frac{\bar{x}_4}{D_4}\right);$$

$$A_4 = 0,16 \cdot 0,125 \cdot 0,9 \cdot 0,58 \cdot 0,25 = 0,00261;$$

$$P(D_1 / x_2 \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{x}_4) = \frac{0,33 \cdot 0,375 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 0,875}{0,032 + 0,014 + 0,035 + 0,00261} = 0,5;$$

$$P(D_2 / x_2 \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{x}_4) = \frac{P(D_2)P(x_2 / D_2)P(\bar{x}_1 / D_2)P(\bar{x}_3 / D_2)P(\bar{x}_4 / D_2)}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4};$$

$$P(D_2 / x_2 \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{x}_4) = \frac{0,24 \cdot 0,375 \cdot 0,7 \cdot 0,86 \cdot 0,25}{0,032 + 0,014 + 0,035 + 0,00261} = 0,2;$$

$$P(D_3 / x_2 \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{x}_4) = \frac{P(D_3)P(x_2 / D_3)P(\bar{x}_1 / D_3)P(\bar{x}_3 / D_3)P(\bar{x}_4 / D_3)}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} = \frac{0,032}{0,079},$$

$$P(D_3 / x_2 \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{x}_4) = 0,4;$$

$$P(D_4 / x_2 \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{x}_4) = \frac{P(D_4)P(x_2 / D_4)P(\bar{x}_1 / D_4)P(\bar{x}_3 / D_4)P(\bar{x}_4 / D_4)}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} = \frac{0,0026}{0,079},$$

$$P(D_4 / x_2 \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{x}_4) = 0,033.$$

Применяя обобщенную формулу Байеса и диагностическую матрицу, можно определить в какой степени износ топливного насоса ( $x_4$ ) влияет на эффективность работы всех четырех форсунок:

$$P(D_1 / \bar{x}_2 \bar{x}_1 \bar{x}_3 x_4) = \frac{P(D_1)P(\bar{x}_2 / D_1)P(\bar{x}_1 / D_1)P(\bar{x}_3 / D_1)P(x_4 / D_1)}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} = \frac{0,0077}{0,178} = 0,043;$$

$$A_1 = P(D_1)P\left(\frac{\bar{x}_2}{D_1}\right)P\left(\frac{\bar{x}_1}{D_1}\right)P\left(\frac{\bar{x}_3}{D_1}\right)P\left(\frac{x_4}{D_1}\right) = 0,0077;$$

$$A_2 = P(D_2)P\left(\frac{\bar{x}_2}{D_2}\right)P\left(\frac{\bar{x}_1}{D_2}\right)P\left(\frac{\bar{x}_3}{D_2}\right)P\left(\frac{x_4}{D_2}\right) = 0,067;$$

$$A_3 = P(D_3)P\left(\frac{\bar{x}_2}{D_3}\right)P\left(\frac{\bar{x}_1}{D_3}\right)P\left(\frac{\bar{x}_3}{D_3}\right)P\left(\frac{x_4}{D_3}\right) = 0,0487;$$

$$A_4 = P(D_4)P\left(\frac{\bar{x}_2}{D_4}\right)P\left(\frac{\bar{x}_1}{D_4}\right)P\left(\frac{\bar{x}_3}{D_4}\right)P\left(\frac{x_4}{D_4}\right) = 0,0548;$$

$$P(D_2 / x_4 \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3) = \frac{P(D_2)P(x_4 / D_2)P(\bar{x}_1 / D_2)P(\bar{x}_2 / D_2)P(\bar{x}_3 / D_2)}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} = \frac{0,067}{0,178} = 0,376;$$

$$P(D_3 / x_4 \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3) = \frac{P(D_3)P(x_4 / D_3)P(\bar{x}_1 / D_3)P(\bar{x}_2 / D_3)P(\bar{x}_3 / D_3)}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} = \frac{0,0488}{0,178} = 0,273;$$

$$P(D_4 / x_4 \bar{x}_3 \bar{x}_1 \bar{x}_2) = \frac{P(D_4)P(x_4 / D_4)P(\bar{x}_1 / D_4)P(\bar{x}_2 / D_4)P(\bar{x}_3 / D_4)}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} = \frac{0,0548}{0,178} = 0,307.$$

Износ топливного насоса (поступление топлива в форсунку) снижает эффективность работы форсунок с полученной вероятностью: первая форсунка – 0,043; вторая – 0,376; третья – 0,273; четвертая – 0,307.

### Заключение

На основании приведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. При выверенной статистике дефектов и их признаков метод Байеса обеспечивает высокую достоверность при диагностировании и прогнозировании технического состояния различного оборудования.

2. Применение виброакустического компьютерного измерительного комплекса позволяет во время работы дизельного двигателя получить спектры вибрации в диапазоне от 5 до 500 Гц топливной аппаратуры при различных режимах работы.

3. Предложенный автором способ определения технического состояния форсунок на работающем двигателе позволяет выполнять анализ спектров вибрации форсунок и топливного насоса и выявлять дефекты на ранней стадии.

4. Из расчетов следует, что закоксованность сопловых отверстий с вероятностью 0,5 ухудшает эффективность работы первой форсунки. Эффективность второй форсунки снижается с вероятностью 0,2. Эффективность третьей форсунки – с вероятностью 0,4, эффективность четвертой форсунки снижается с вероятностью 0,033. Следовательно, необходимо заменить первую и третью форсунки.

### Литература

1. Диагностика и техническое обслуживание машин для сельского хозяйства : учеб. пособие для студентов вузов по специальностям «Ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве», «Техническое обеспечение процессов сельскохозяйственного производства», «Проектирование и производство сельскохозяйственной техники» / А. В. Новиков [и др.] ; Минсельхозпрод Респ. Беларусь, БГАТУ ; под ред. А. В. Новикова. – 2-е изд. – Минск : БГАТУ, 2010. – 404 с.
2. Павлов, Б. В. Диагностика «болезней» машин (Как инженеры овладевают языком машин) / Б. В. Павлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Колос, 1978. – 143 с.
3. Грунтович, Н. В. Вибродиагностирование топливных форсунок на работающем двигателе / Н. В. Грунтович, Д. В. Кирдищев // Агротехника и энергообеспечение. – 2016. – Т. 2, № 4 (13). – С. 47–55.
4. Грунтович, Н. В. Техническое диагностирование форсунок дизелей во время их работы / Н. В. Грунтович, Д. В. Кирдищев // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 22–24 нояб. 2017 г. / редкол.: В. П. Чеботарев [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2017. – С. 457–460.
5. Грунтович, Н. В. Техническое диагностирование дизельных двигателей по спектрам вибрации корпуса для обеспечения долговечности, безотказности и экономичности / Н. В. Грунтович, Д. В. Кирдищев // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Белагро – 2018», Минск, 7–8 июня 2018 г. ; редкол.: Н. Н. Романюк [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2018. – С. 131–146.
6. Грунтович, Н. В. Разработка диагностической модели дизельных форсунок по результатам вибродиагностирования / Н. В. Грунтович, Д. В. Кирдищев, В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2017. – № 2 (69). – С. 18–24.
7. Науменко, А. П. Научно-методические основы вибродиагностического мониторинга поршневых машин в реальном времени : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.13 / А. П. Науменко. – Омск : ОмГТУ, 2012. – 423 с.
8. Способ определения технического состояния форсунок на работающем двигателе : пат. 2667738 Рос. Федерация от 24 сент. 2018 г. RU 2667738 С2 / Н. В. Грунтович, Н. В. Грунтович, Д. В. Кирдищев.
9. Науменко, А. П. Вероятностно-статистические методы принятия решений: Теория, примеры, задачи : учеб. пособие / А. П. Науменко, И. С. Кудрявцева, А. И. Одинец ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : ОмГТУ, 2018. – 84 с.

10. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.
11. Грунтович, Н. В. О некоторых способах получения информации в условиях неопределенности: детерминистические и стохастические аспекты / Н. В. Грунтович, О. В. Чаус // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2012. – № 3. – С. 99–107.

*Получено 17.02.2021 г.*