Научная статья УДК 621. 436. 2

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ДЕФЕКТОВ ДИЗЕЛЬНОЙ ФОРСУНКИ

¹Николай Васильевич Грунтович, ²Дмитрий Владимирович Кирдищев ¹ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ», Минск, Республика Беларусь ²ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия

Аннотация. За анализируемые период (2005-2022 гг.) в сельскохозяйственных организациях России количество тракторов сократилось в 2,2 раза. Особенно резкое снижение тракторного парка отмечается в 2015 г. по сравнению с 2005 г. на 46,9%. Отрицательная динамика наблюдается и в разрезе регионов. Снижение уровня оснащённости техническими средствами и повышение нагрузки на сельскохозяйственную технику приводит к преждевременному износу машин и оборудования, увеличению эксплуатационных издержек. На диагностирование топливной аппаратуры дизельного двигателя затрачивается наибольшее количество времени. Большинство ее методов предполагает частичную разборку двигателя, что увеличивает себестоимость работ. Поэтому разработка новых методов диагностирования является актуальной задачей. На основе большого экспериментального материала было показана возможность применения виброакустических характеристик для диагностирования форсунок во время работы дизеля. Рассматриваются практические результаты технического диагностирования топливной аппаратуры дизеля с использованием виброакустических характеристик. На основе заданной диагностической матрицы, метода Байеса и метода последовательного анализа выполнены расчеты по определению влияния снижения упругости пружины форсунки на эффективность работы топливной форсунки, и взаимосвязи увеличенной затяжки пружины форсунки с высокой амплитудой на частоте 115 Гц. Результаты расчетов, основанных на вероятностно-статистических методах, показали: снижение упругости пружины при низкой амплитуде на частоте 49 Гц наступает с вероятностью 0,51. Высокая амплитуда на частоте 115 Гц взаимосвязана со степенью затяжки пружины топливной форсунки.

Ключевые слова: топливная аппаратура, диагностирование, дизель, метод Байеса, метод последовательного анализа, виброакустические характеристики.

Для цитирования: Грунтович Н.В., Кирдищев Д.В. Применение вероятностно-статистических методов при выявлении дефектов дизельной форсунки // Вестник Брянской ГСХА. 2024. № 1 (101). С. 58-62.

Original article

APPLICATION OF PROBABILISTIC AND STATISTICAL METHODS IN THE DETECTION OF DIESEL NOZZLE DEFECTS

¹Nikolai V.Gruntovich, ²Dmitry V. Kirdishchev ¹ GIPK GAZ-INSTITUT, Minsk, Republic of Belarus ²Bryansk StateAgrarianUniversity, Bryansk region, Kokino, Russia

Abstract. During the analyzed period (2005-2022), the number of tractors in agricultural organizations in Russia decreased by 2.2 times. A particularly sharp decline in the tractor fleet was noted in 2015 compared to 2005 by 46.9%. Negative dynamics is also observed in the context of regions. A decrease in the level of equipment with technical means and an increase in the load on agricultural machinery leads to premature wear of machinery and equipment, an increase in operating costs. The largest amount of time is spent on testing the fuel equipment of a diesel engine. Most of its methods involve partial disassembly of the engine, which increases the cost of work. Therefore, the development of new methods of diagnostics is an urgent task. On the basis of a large experimental material, the possibility of using vibroacoustic characteristics for diagnosing injectors during diesel operation was shown. Practical results of technical diagnostics of diesel fuel equipment with the use of vibroacoustic characteristics are considered. Based on the given diagnostic matrix, the Bayes's method and the sequential analysis method, calculations were performed to determine the effect of a decrease in the elasticity of the nozzle spring on the fuel injector efficiency, and the relationship of the diagnosis increased the tightening of the nozzle spring with a sign of high amplitude at a frequency of 115 Hz. The results of calculations based on probabilistic and statistical methods showed that a decrease in spring elasticity at a low amplitude at a frequency of 49 Hz occurs with a probability of 0.51.A high amplitude at a frequency of 115 Hz is a sign of the diagnosis of increased tightening of the fuel injector spring.

Keywords: fuel equipment, diagnostics, diesel, Bayes's method, sequential analysis method, vibroacoustic characteristics.

For citation: N.V.Gruntovich, D.V. Kirdishchev. Application of probabilistic and statistical methods in the detection of diesel nozzle defects. Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2024; (1): 58-62 (In Russ.).

Введение. Эффективное развитие сельского хозяйства в условиях импортозамещения и обеспечения продовольственной безопасности страны, в том числе региона предполагает создание определённых условий по оснащению сельскохозяйственных организаций машинно-тракторным парком. В свою очередь, от наличия, качественного состава и интенсивности использования парка основных видов техники зависит уровень механизации хозяйственных работ, и, как следствие увеличение объёма произведённой сельскохозяйственной продукции, а также повышение производительности труда в АПК [1].

Цель исследований: Выявление дефектов топливной аппаратуры с применением вероятностно-статистических методов по виброакустическим спектрам.

Средством, повышающим качество и эффективность технического обслуживания, ремонта и эксплуатации топливной аппаратуры является техническое диагностирование [2]. Большинство методов диагностирования топливной аппаратуры предполагает частичную разборку двигателя, что увеличивает себестоимость работ. Поэтому разработка новых методов диагностирования является актуальной задачей.

Для выявления дефектов топливной аппаратуры используются как детерминированные, так и вероятностно-статистические методы принятия решений.

Вероятностно-статистические методы применяют в тех случаях, когда необходимо определить одно из состояний «исправное» или «неисправное». Суть методов заключается в применении вероятностных моделей на основе оценивания и проверки гипотез при помощи выборочных характеристик [2].

Основное преимущество вероятностно-статистических методов распознавания состоит в возможности одновременного учёта признаков различной физической природы или механизмов формирования, так как эти методы оперируют безразмерными величинами — вероятностями их появления при возникновении различных состояний системы [3].

На практике используются следующие статистические методы распознавания ситуации: метод Байеса и метод последовательного анализа (Вальда).

Материалы и методы. Основываясь на теории вибродиагностирования топливной аппаратуры, изложенной в статьях [4,5,6] разработан алгоритм определения степени износа элементов топливной аппаратуры по методу Байеса и методу последовательно анализа (Вальда). Научная новизна выполненных исследований подтверждена патентом $P\Phi$ [7].

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

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

При этом сумма вероятностей всех возможных реализаций признака равна единице.

Для определения вероятности диагнозов по методу Байеса необходимо составляем диагностическую матрицу топливной аппаратуры (табл. 2), которая формируется на основе предварительно статистического материала, полученного при анализе вибродиагностических спектров (рис. 1) [8].

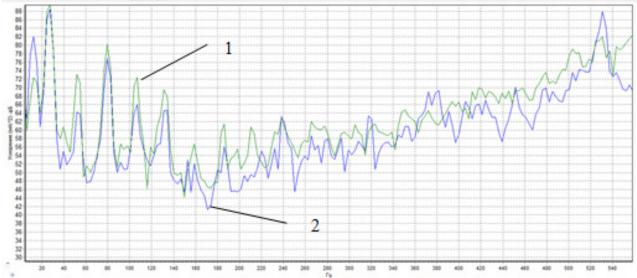


Рисунок 1- Пример спектра вибрации дизельных форсунок Д-240 с наработкой 518 моточасов на 700об/мин: 1- первая форсунка; 2 -третья форсунка.

Результаты и их обсуждение. Для составления диагностической матрицы определим по статическим данным P(Di) — вероятность диагноза Di. Так, если предварительно обследовано N объектов и у Ni объектов имелось состояние Di, то вероятность P(Di) постановки диагноза Di определяется как:

$$P(Di)=N_i/N$$

Т.е., если исследовано N=12 форсунок, из которых три имеют снижение упругости пружины $(N_I=3)$, то вероятность диагноза снижение упругости пружины $P(D_I)=3/12=0.25$

Далее определяем P(xj/Di) — вероятность появления признака xj у объектов с состоянием Di. Если среди Ni объектов, имеющих диагнозов Di у Nij, проявился признак x_i , то

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

Т.е., если у трёх форсунок с диагнозом снижение упругости пружины ($N_I = 3$) 2 форсунки имеют низкую амплитуду на частоте 49 Γ ц (Nij = 2), то вероятность появления признака «низкая амплитуда на частоте 49 Γ ц» у форсунок со снижение упругости пружины составляет $P(x_I/D_3) = 2/3 = 0,66$.

Табли	ца 1 - Диагностическая матрі	ица топливной	аппаратуры в м	иетоде Байеса

			1 21		
	Признак				
Диагноз D _i	Низкая амплитуда	Низкая амплитуда	Высокая амплитуда	Низкая амплитуда на	
топливной	на частоте 49 Гц	на частоте 73Гц	на частоте 115Гц	частоте 137 Гц	P(Di)
аппаратуры	\mathbf{x}_1	\mathbf{x}_2	\mathbf{x}_3	x_4	
	$P(x_1 / D_i)$	$P(x_2 / D_i)$	$P(x_3 / D_i)$	$P(x_4 / D_i)$	
D_1	0,66	0,5	0,16	0,22	0,25
D_2	0,33	0,5	0,16	0,22	0,16
D_3	0,33	0,5	0,16	0,44	0,5
D_4	0,6	0,9	0,5	0,55	0,75

Применяя обобщенную формулу Байеса и числовые значения из таблицы 2, определим вероятность D_1 Снижение упругости пружины, D_2 , Закоксованность сопловых отверстий D_3 Увеличенная затяжка пружины и D_4 Износ ТНВД.

Пример 1. Определим, с какой вероятностью наступит снижение упругости пружины при низкой амплитуде на частоте 49 Гц.

$$P(D_{1} \mid x_{1}\bar{x}_{2}\bar{x}_{3}\bar{x}_{4}) = \frac{P(D_{1}) \cdot P(x_{1} \mid D_{1}) \cdot P(\bar{x}_{2} \mid D_{1}) \cdot P(\bar{x}_{3} \mid D_{1}) P(\bar{x}_{4} \mid D_{1})}{A_{1} + A_{2} + A_{3} + A_{4}}$$

$$A_{1} = P(D_{1}) \cdot P(x_{1} \mid D_{1}) \cdot P(\bar{x}_{2} \mid D_{1}) \cdot P(\bar{x}_{3} \mid D_{1}) \cdot P(\bar{x}_{4} \mid D_{1})}{A_{1} = 0.25 \cdot 0.66 \cdot 0.5 \cdot 0.84 \cdot 0.78 = 0.054}$$

$$A_{2} = P(D_{2}) \cdot P(x_{1} \mid D_{2}) \cdot P(\bar{x}_{2} \mid D_{2}) \cdot P(\bar{x}_{3} \mid D_{2}) \cdot P(\bar{x}_{4} \mid D_{2})}{A_{2} = 0.16 \cdot 0.33 \cdot 0.5 \cdot 0.84 \cdot 0.78 = 0.017}$$

$$A_{3} = P(D_{3}) \cdot P(x_{1} \mid D_{3}) \cdot P(\bar{x}_{2} \mid D_{3}) \cdot P(\bar{x}_{3} \mid D_{3}) \cdot P(\bar{x}_{4} \mid D_{4})}{A_{3} = 0.5 \cdot 0.33 \cdot 0.5 \cdot 0.84 \cdot 0.36 = 0.024}$$

$$A_{4} = P(D_{4}) \cdot P(x_{1} \mid D_{4}) \cdot P(\bar{x}_{2} \mid D_{4}) \cdot P(\bar{x}_{3} \mid D_{4}) \cdot P(\bar{x}_{4} \mid D_{4})}{A_{4} = 0.75 \cdot 0.6 \cdot 0.1 \cdot 0.5 \cdot 0.45 = 0.01}$$

$$P(D_{2} \mid x_{2}\bar{x}_{1}\bar{x}_{3}\bar{x}_{4}) = \frac{0.25 \cdot 0.66 \cdot 0.5 \cdot 0.84 \cdot 0.78}{0.054 + 0.017 + 0.02 + 0.01} = 0.51$$

Из расчетов видно, что снижение упругости пружины (диагноз D_1) при низкой амплитуде на частоте 49 Γ ц наступает с вероятностью 0,51.

Поясним сущность метода последовательного анализа на следующем примере. Пусть при диагнозе D_I простой признак x_I встречается с вероятностью $P(x_I/D_I)=0,66$, для диагноза D_2 соответственно $P(x_I/D_2)=0,33$. Если у объекта с комплексным признаком X^* наблюдается признак x_I и при диагнозе D_I он встречается чаще, чем при D_2 , то можно сделать вывод в пользу диагноза D_I при

$$\frac{P(x_1/D_1)}{P(x_1/D_2)} > A, X^* \in D_1$$

где A — верхняя граница принятия решения.

В противоположном случае, когда признак x_l значительно чаще встречается при диагнозе D_l , принимается решение в пользу диагноза D_2 при

$$\frac{P(x_1/D_1)}{P(x_1/D_2)} < B, X^* \in D_2$$

где B — нижняя граница принятия решения.

Отношение вероятностей
$$B < \frac{P(x_1/D_1)}{P(x_1/D_2)} < A$$
, называют отношением правдоподобия.

Если полученное выражение больше некоторого порогового значения A, то ставится диагноз A, если меньше некоторого порогового значения B, то ставится диагноз B [9].

Пороговые значения рассчитывают, исходя из вероятностей ошибок первого α и второго β рода, которые считаются заданными. В практических расчётах обычно принимают $\alpha = \beta = 0.05...0.1$.

$$A \le \frac{1-\beta}{\alpha} = \frac{1-0.1}{0.1} = 9 \tag{2}$$

$$A \le \frac{1-\beta}{\alpha} = \frac{1-0.1}{0.1} = 9$$

$$B \ge \frac{\beta}{1-\alpha} = \frac{0.1}{1-0.1} = 0.111$$
(3)

Если в результате первой проверки данное условие не выполняется, то необходима следуюшая проверка, тогда отношение правдоподобия:

$$B < \frac{P(x_1/D_1)}{P(x_1/D_2)} \cdot \frac{P(x_2/D_1)}{P(x_2/D_2)} < A$$

Для упрощения вычислений отношений правдоподобия формулы (2), (3), представляют в виде логарифмов отношений и тогда условия принятия гипотез записывают следующим образом [10]:

$$ln(A) = 2,19$$

 $ln(B) = -2,19$

Условие продолжения испытаний:

$$-2.19 < \ln(\frac{P_1}{P_0}) < 2.19$$
 или $-2.19 < \ln(L_i) < 2.19$ (4)

Если использована вся имеющаяся в распоряжении информация, и ни один из порогов так и не достигнут, то делается заключение, что информации недостаточно для постановки диагноза [11].

Все выбранные нами форсунки имеют какой-либо признак $P(x_i/D_i)$. Поэтому необходимо определить вероятность наступления одного из диагнозов при последовательном появлении каждого из признаков.

Выводы. Основываясь на вероятностно - статистических методах были получены следующие результаты:

- снижение упругости пружины при низкой амплитуде на частоте 49 Гц наступает с вероятностью 0,51.
- высокая амплитуда на частоте 115Гц взаимосвязана со степенью затяжки пружины топливной форсунки.

Наличие статистики дефектов топливной аппаратуры позволяет использовать вероятностно статистические метолы, повышающие достоверность диагностирования.

Список источников

- 1. Развитие АПК и сельских территорий: проблемы и перспективы: коллектив, монография / А.О. Храмченкова, Е.П. Чирков, Т.В. Иванюга, О.Н. Коростелева, Е.М. Подольникова, М.А. Бабьяк, А.В. Кубышкин, О.В. Дьяченко, А.А. Кузьмицкая, Н.А. Тимошенко, О.М. Хохрина, Д.Н. Кирдищева, Л.В. Лебедько, В.И. Репникова, Т.А. Казимирова; под общ. ред. А.О. Храмченковой. М.: ООО «Первое экономическое издательство», 2022. 268 с.
 - 2. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
- 3. Кирдищев Д.В. Применение методов Байеса при выявлении дефектов топливной аппаратуры по виброакустическим характеристикам во время работы дизеля // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого: научнопрактический журнал. 2021. № 1. С. 92-99.
- 4. Грунтович Н.В., Кирдищев Д.В. Методика технического диагностирования топливной аппаратуры дизельных двигателей по виброакустическим спектрам // Модернизация и повышение качества технического обслуживания сельскохозяйственной техники: сб. науч. тр. по материалам нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Ярославль, 2021. С. 17-22.
- 5. Грунтович Н.В., Кирдищев Д.В. Вибродиагностирование топливных форсунок во время работы дизеля // Проблемы энергообеспечения, автоматизации, информатизации и природопользования в АПК: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2023. С. 95-98.
- 6. Кирдищев Д.В. Техническое диагностирование топливных форсунок на стендах в ремонтных мастерских // Проблемы энергообеспечения, автоматизации, информатизации и природопользования в АПК: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2020. С. 73-76.
- 7. Способ определения технического состояния форсунок на работающем двигателе: пат. 2667738 Рос. Федерация: F02M65/00 / Грунтович Н.В., Грунтович Н.В., Кирдищев Д.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО "Брянский государственный аграрный университет". - № 2017108026; заявл. 10.3.2017; опубл. 24.9.2018, Бюл. № 27.

- 8. Грунтович Н.В., Кирдищев Д.В. Применение метода Байеса при выявлении дефектов топливной аппаратуры дизеля по виброакустическим характеристикам // Проблемы энергообеспечении, автоматизации, информатизации и природопользования в АПК: материалы междунар. науч.-техн. конф. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2022. С. 65-69.
- 9. Кирдищев Д.В. Применение метода последовательного анализа при выявлении дефектов топливной аппаратуры дизеля // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 4 (49). С. 12-17.
- 10. Вальд А. Последовательный анализ. М.: Государственное изд-во физико-математической литературы, 1960. 328 с.
- 11. Грунтович Н.В., Кирдищев Д.В. Применение метода Вальда при выявлении дефектов топливных форсунок дизеля // Проблемы энергообеспечения, автоматизации, информатизации и природопользования в АПК: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2023. С. 99-105.

Информация об авторах:

- **Н.В. Грунтович** доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и эффективное использование ТЭР», ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ».
 - Д.В. Кирдищев старший преподаватель, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

Information about the authors:

N.V.Gruntovich - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Efficient Use of Thermal Power Plants, GIPK GAZ-INSTITUT.

D.V. Kirdishchev - Senior lecturer, Bryansk StateAgrarianUniversity

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 14.11.2023; одобрена после рецензирования 24.11.2023, принята к публикации 31.01.2024.

The article was submitted 14.11.2023; approved after rewiewing 24.11.2023; accepted for publication 31.01.2024.

© Грунтович Н.В., Кирдищев Д.В.