

УДК 629.11

**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ  
УЗЛОВ И СИСТЕМ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

**Тарасенко В.Е.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент, **Жешко А.А.<sup>2</sup>**, к.т.н., доцент

<sup>1</sup>БГАТУ, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»,  
г. Минск, Республика Беларусь

Современные машины и их двигатели существенно отличаются улучшенными эксплуатационными свойствами (повышенными скоростями движения, надежностью работы агрегатов и систем, экономичностью и т.д.). Улучшение эксплуатационных характеристик машин привело к усложнению их конструкции, повышению точности изготовления деталей и их сборки [1, 2]. Именно поэтому ранее существующие способы и методы контроля технического состояния двигателя сегодня не могут в полной мере удовлетворить техническую службу предприятий, так как необходимы современные диагностические комплексы, а также методики комплексного диагностирования. Качественное определение технического состояния узлов, агрегатов и систем современных двигателей возможно только при условии применения высокопроизводительного специализированного диагностического оборудования и современных методов контроля, обеспечивающих получение достоверных результатов.

Экспериментальные исследования [3], проведенные на инженерном факультете университета Перуджа (Италия), показали, что как вибрационные, так и акустические сигналы, измеренные на головке цилиндров, строго соответствуют процессам внутри цилиндров. Учеными были предложены вибрационные и акустические показатели для оценки работы двигателя. Их значения, полученные для различных режимов нагружения двигателя, представляют собой эталонные значения. Предложенная методика оценки таких индексов позволяет оценить качество работы двигателя путем сравнения измеренных и эталонных значений.

Совместные исследования австрийских и венгерских ученых [4] позволили разработать аппаратные и программные средства для вибрационной и шумовой диагностики двигателя. Основной сложностью проведения подобных испытаний является то, что частота вращения коленчатого вала двигателя постоянно меняется, также непостоянной является скорость поршня во время рабочего хода. Данные особенности вибродиагностики позволяют выявлять дефекты в двигателе только на определенных частотах путем сопоставления шумов, снятых во время испытаний с хранящимися в базе данных шумами. Для выявления дефектов на различных режимах работы двигателя, учеными предложено снимать шумовые характеристики не по временному интервалу, а по углу поворота коленчатого вала двигателя и подвергать собранные данные последующей математической обработке.

Исследования, проведенные в университете Монастир (Тунис) [5], подтвердили целесообразность обнаружения неисправностей при впрыске топлива путем сбора информации об амплитуде вибрационного сигнала двигателя в зависимости от угла поворота коленчатого вала и диапазона частот. Вибрационный сигнал в диапазоне частот получают с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье. Исследования проводились на рядном шестицилиндровом двигателе, в одном из цилиндров которого давление понижалось на 10 и 50% для изучения ошибок при впрыске топлива.

Изучению спектров вибрации различных типов двигателей внутреннего сгорания посвящена работа венгерских ученых из Обудского университета [6]. Исследования 3-х и 4-х цилиндровых двигателей показали, что количество цилиндров оказывает значительное влияние на характеристики спектра вибрации.

В научной работе польских ученых из Познаньского технического университета [7] описываются преимущества виброакустической диагностики. Среди них такие, как высокий потенциал виброакустического сигнала; высокая скорость передачи данных; сигнал отражает как основные рабочие процессы двигателя, так и вспомогательные процессы работы отдельных узлов и механизмов; измерение сигнала не требует специальной подготовки двигателя к

испытаниям и может быть осуществлено во время рабочего процесса. По результатам исследований частот колебаний отдельных деталей, авторами разработана модель распространения вибрации в двигателе внутреннего сгорания, что позволило развить новое направление в вибродиагностике – исследование с помощью моделей.

В работе польских ученых из Силезского университета [8] проведены исследования вибросигнала четырёхцилиндровых двигателей. Отказ моделировался путем смещения приводного ремня. Результаты подвергались математической обработке, что позволило выявить неисправности двигателя.

Целью работы Австралийских ученых [9] являлась разработка автоматизированной системы диагностики двигателей внутреннего сгорания, путем разработки соответствующего программного и аппаратного обеспечения.

Авторы разделяют неисправности в двигателе, которые целесообразно использовать для выявления неисправностей при вибродиагностике, на две основные группы: связанные со сгоранием топлива (стуки в двигателе и нарушение воспламенения смеси) и механические неисправности, такие как стуки поршня и подшипников коленчатого вала. Для достижения поставленной цели авторами были разработаны имитационные модели, позволяющие осуществлять моделирование крутильных колебаний коленчатого вала двигателя и углового ускорения блока. На основании полученных от моделирования наборов данных проводилось обучение нейронных сетей, что в конечном итоге позволило разработать алгоритм, реализованный автоматизированной системе диагностики неисправностей двигателя.

В последние годы широкое распространение получил интеллектуальный контроль за состоянием машин. После предварительной обработки сигнала извлекается необходимая информация, затем происходит дополнительная обработка и данные передаются в блок интеллектуальной диагностики. Подобные системы, основанные на искусственном интеллекте и анализе дерева принятия решений, применялись для изучения неисправностей вращающихся элементов [10, 11]. Также для виброакустического анализа неисправностей широко применяется в мировой практике метод опорных векторов (SVM – support vector machine) [12-17].

В большинстве научных работ [17-22] авторы пытаются объединить SVM – метод и обучение ИНС искусственных нейронных сетей (ANN – Artificial neural networks). Методы ИНС широко используются при разработке различных классификаций, а также в технологиях распознавания образов. Наиболее используемая сеть в вибродиагностике – прямого распространения (Feedforward). Все связи в ней направлены строго от входных нейронов к выходным. Примерами таких сетей являются перцептрон Розенблатта, многослойный перцептрон, сети Ворда.

Для диагностирования неисправностей двигателей, а также других узлов и агрегатов тракторов и автомобилей, широкое распространение в настоящее время получили различные пакеты для анализа. Среди них следует выделить коммерческое программное обеспечение для моделирования и анализа процессов в многодисциплинарных системах – Amesim. Оно является составной частью системного инжиниринга в области создания мехатронных систем. Программный пакет представляет собой набор инструментов, используемых для моделирования, анализа и прогнозирования производительности мехатронных систем. Поведение гидравлических, пневматических, термодинамических, электрических и механических систем описываются с помощью нелинейных нестационарных аналитических уравнений.

#### Литература

1. Северный, А.Э. Руководство по техническому диагностированию при техническом обслуживании и ремонте тракторов и сельскохозяйственных машин / А.Э. Северный, Д.С. Буклагин, В.М. Михлин [и др.]. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2001. – 252 с.
2. Система технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственных машин по результатам диагностирования. – М.: Информагротех, 1995. – 64 с.

3. L. Barelli, G. Bidini, C. Buratti, R. Mariani / Diagnosis of internal combustion engine through vibration and acoustic pressure non - intrusive measurements. Applied Thermal Engineering, Elsevier, 2010.
4. Pál Bánlaki, Zoltán Magosi / Part failure diagnosis for internal combustion engine using noise and vibration analysis, Periodica Polytechnica 2010.
5. Ezzeddine Ftoutou, Mnaouar Chouchane / Injection Fault Detection of a Diesel Engine by Vibration Analysis, Springer International Publishing AG 2018.
6. Ferenc Dömötör1, József Zoltán Szabó / Vibration Diagnostics as an effective Tool for Testing Engines of Internal Combustion, production engineering archives 2017.
7. F. Tomaszewski, G. M. Szymanski/ Frequency Analysis of Vibrations of the Internal Combustion Engine Components in the Diagnosis of Engine Processes, The Archives of Transport, 2012.
8. Z. Stanik, J. Warczek/ Application of Vibration Signals In the Diagnosis of Combustion Engines – exploitation practices, Journal of Kones Powertrain and Transport, 2011.
9. Jian Chen, B.Eng., M.Eng. Internal Combustion Engine Diagnostics Using Vibration Simulation / School of Mechanical and Manufacturing Engineering The University of New South Wales, 2013.
10. Santos S. P. (2008), “Application of multiple decision trees for condition monitoring in induction motors”, Neural Networks 2008 & IEEE World Congress on Computational Intelligence, Hong Kong, China.
11. Yang, B.S., Park, C. H. and Kim, H. J. (2000), “An efficient method of vibration diagnostics for rotating machinery using a decision tree”, International Journal of Rotating Machinery, vol. 6, no.1, pp.19–27.
12. Yuan S. F., Chu F. L. (2006), “Support vector machines-based fault diagnosis for turbo-pump rotor”, Mechanical System and Signal Processing, vol.20, no.4, pp.939–952.
13. Knapp G. M. & Wang H. P. (1992), “Machine fault classification: a neural network approach”, International Journal of Production Research, vol.30, no.4, pp.811-823.
14. Li, B., Chow, M.Y., Tipsuwan, Y., Hung, J.C. (2000), “Neural-network-based motor rolling bearing fault diagnosis”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.47, no.5, pp.1060-1069.
15. Samanta, B. and Al-Balushi, K. R. (2001), “Use of wavelets and artificial neural network in gear fault diagnosis”, Journal of Mechanical Engineering, vol.52, no.1, pp.21-31.
16. Samanta, B. and Al-Balushi, K. R. (2003), “Artificial neural network based fault diagnostics of rolling element bearings using time domain features”, Mechanical Systems and Signal Processing, vol.17, no.2, pp.317-328.
17. Hoffman A.J. and Van der Merwe N.T. (2002), "The application of neural networks to vibrational diagnostics for multiple fault conditions", Computer Standards & Interfaces, vol.24, no.2, pp.139-149.
18. Hayashi S., Asakura T. and Zhang S. (2002), “Study of machine fault diagnosis system using neural networks,” Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, Hawaii, USA, pp.233-238.
19. Crupi V., Guglielmino E. and Milazzo G. (2004), “Neural-network-based system for novel fault detection in rotating machinery”, Journal of Vibration and Control, vol.10, no.8, pp.1137-1150.
20. Nahvi H. and Esfahanian M. (2005), “Fault identification in rotating machinery using artificial neural networks”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 219, no.2, pp.141-158.
21. Gao R. X., Wang C., Yan R., Malhi A.(2006), “A neural network approach to bearing health assessment”, Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, Vancouver, Canada, pp.899-906.
22. Rafiee J., Arvani F., Harifi A., and Sadeghi M. H.(2007), “Intelligent condition monitoring of a gearbox using artificial neural network”, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 21, no.4, pp.1746-1754.