

МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЗАРОЖДАЮЩИХСЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В.Е. Тарасенко,

зав. каф. технологий и организации технического сервиса БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

О.Ч. Ролич,

ведущ. инженер-программист ООО «ЮНИК-ЛАБ», канд. техн. наук, доцент

А.А. Жешко,

*ст. науч. сотр. РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»,
канд. техн. наук, доцент*

Представлены результаты анализа методов диагностирования автотракторных двигателей, в том числе зарождающихся эксплуатационных дефектов. Описаны современные виброакустические методы, позволяющие обеспечить индивидуализацию оценки состояния деталей двигателя в течение срока эксплуатации. Приведены результаты комплекса научно-исследовательских работ по испытанию форсунок CRIN2 автотракторных двигателей различной наработки, а также анализа их вибрационных характеристик. Выполнены разложение исходного сигнала на уровни и регистрация амплитуд колебаний, присущих определенным уровням разложения, что позволило составить характерные частоты колебания элементов форсунки. Предложено решение, позволяющее дополнить разработанную ранее многоканальную измерительную систему функциональными возможностями по регистрации и оценке вибросигналов от MEMS-датчиков на основе микропружинной связи.

Ключевые слова: диагностирование, двигатель, метод, износ, датчик, сигнал, стенд, форсунка, спектр.

The article presents the results of the analysis of methods for diagnosing automotive engines, including emerging operational defects. Modern vibroacoustic methods are described, which allow to provide individualization of condition assessment of engine parts during the service life. The results of a set of research works on testing CRIN2 nozzles of automotive engines of various operating hours, as well as an analysis of their vibration characteristics are given. Decomposition of the initial signal into levels and registration of amplitudes of oscillations inherent to certain levels of decomposition were performed, which made it possible to compile characteristic frequencies of oscillations of nozzle elements. A solution is proposed to supplement the previously developed multichannel measurement system with functional capabilities for registration and evaluation of vibration signals from MEMS sensors based on microspring coupling.

Key words: diagnostics, engine, method, wear, sensor, signal, stand, nozzles, spectrum.

Введение

В мировой практике создания и эксплуатации машин актуальными остаются проблемы обеспечения надежности их работы, безразборного контроля и прогнозирования технического состояния. Увеличение ресурса и повышение надежности машин и механизмов предполагают переход на эксплуатацию технических объектов по фактическому состоянию, а это возможно только при наличии эффективных методов и средств диагностирования [1].

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что внедрение современных средств диагностирования является одним из важнейших факторов повышения экономической эффективности использования машин и механизмов в народном хозяйстве [1; 2].

Исследования многих отечественных и зарубежных ученых позволяют утверждать о том, что вибрации являются носителями уникальной информации о тончайших нюансах поведения конструкции и действующих в ней рабочих процессов. По скорости реакции на любые изменения состояния вибрациям нет равных среди других сопровождающих физических явлений. Структуры вибраций указывают на свое происхождение, т.е. демаскируют дефект. После устранения дефекта вибрации существенно ослабевают [3].

Вибросигналами оценивают зазоры и некоторые дефекты сопряжений, но и один механизм эмитирует широкий спектр реверберирующих сигналов – от десятка Гц до сотен кГц и МГц, т.е. образуется широкополосный виброакустический фон, в котором полезный сигнал скрыт. Выделить в нем нужный сигнал

затруднительно. Отношение полезного вибросигнала к фону, порой, невелико и добротность диагностики невысока [4].

При виброконтроле получают разнообразные, иногда трудно понимаемые спектры, осциллограммы и другие характеристики сигналов, хотя некоторые из них имеют информативные качественные признаки и количественные характеристики. Поэтому чтобы выделить из вибрационного фона сигнал от одного механизма при работе в агрегате нескольких, требуется установка самого информативного режима работы объекта контроля, а также специальная установка вибродатчиков, частотная и временная селекция сигналов в виброаппаратуре [4].

Целью данной работы является разработка научных основ для создания технологии диагностирования, реализация которой позволяет детектировать, распознавать и идентифицировать зарождающиеся эксплуатационные дефекты деталей автотракторных двигателей.

Основная часть

Достаточно полная классификация методов диагностирования автотракторных двигателей изложена в работах Мигалы В.Д. [5, 6], где рассмотрены интеллектуальные и инструментальные методы, анализ которых позволяет отметить 12 групп методов диагностирования, позволяющих формировать массив данных с высокой степенью достоверности. Наибольший интерес представляют группы методов контроля износа трущихся деталей и смазки – виброакустические, энергетические и гидрогазоаэродинамические. В группе виброакустических методов выделены такие виды, как частотный и спектральный анализ, корреляционный анализ взаимных спектров вибрации и сопоставление спектров.

Исследования последних лет авторов публикации позволили привнести в данную группу новый вид – анализ вейвлетных образов сигналов (рис. 1), позволяющий обеспечить высокую достоверность при

Виброакустические	
Виды методов	Области применения
Спектральный анализ вибрации: - частотный анализ; - спектральный анализ; - анализ ударных импульсов; - кепстральный анализ; - анализ спектра вибрации по огибающей; - фазовое сравнение сигналов вибрации; - амплитудно-временной анализ сигналов вибрации; - корреляционный анализ взаимных спектров вибрации; - определение акустической эмиссии; - статистический анализ вибрационных характеристик; - модуляция вибрационных процессов; - амплитуда вибрации пик-фактора; - величина эксцесса; - резонансная частота узла (детали), механизма, газовых и гидравлических потоков; - сопоставление спектров; - анализ вейвлетных образов сигналов.	Исследование динамических характеристик конструкции, технологий производства и технического состояния двигателей в эксплуатации. Высокая информационность вибрационных сигналов на изменение структурных, функциональных и динамического состояния деталей машин. Высокая универсальность, чувствительность и избирательность вибрационного сигнала к параметрам механических, гидравлических, газо- и аэродинамических, электрических и магнитных систем. Большой объем информации в одном измерении вибрации, высокая скорость диагностирования, позволяющая автоматизировать контроль технического состояния. Нормирование вибрации для контроля уровня проектирования, качества изготовления и эксплуатации.
Энергетические и гидрогазоаэродинамические методы	
Механический КПД. Индикаторные показатели (мощность, КПД, расход топлива). Эффективная мощность. Неравномерность работы цилиндров. Скорость и неравномерность вращения коленчатого вала. Компрессионные свойства цилиндров. Внутрицикловое изменение (колебание) угловой скорости коленчатого вала. Изменение крутящего момента и угловой скорости вала по углу поворота при равномерной работе цилиндров. Амплитудно-фазовые параметры (осциллограммы) изменения напряжения, тока, сопротивления в первичной и вторичной цепях (переходных процессов) зажигания, давления в цилиндрах.	Диагностика ЦПГ, КШМ, элементов топливной системы (насосов, гидравлического аккумулятора, форсунок, системы сгорания и расхода топлива). Доводка конструкции двигателей до заданных технических характеристик, оценка качества ремонта и эксплуатации отдельного двигателя и в составе транспортного средства.

Рисунок 1. Отдельные группы методов диагностирования автотракторных двигателей (виброакустические, энергетические и гидрогазоаэродинамические) с привнесенным подвидом анализа вейвлетных образов сигналов

идентификации дефектов в узлах и агрегатах дизельных двигателей.

Известно, что все узлы имеют собственную резонансную частоту. На этом основан метод вибродиагностирования, предложенный В.И. Соловьевым, В.А. Аллилуевым, В.И. Беляевым [7]. При резонансном вибродиагностировании осуществляется контроль слабой амплитуды вибросигнала в резонансной частоте пьезоакселерометра. Географическая, фазовая (временная), частотная и резонансная селекции при получении вибросигнала позволяют оценивать форму и амплитуду сигнала.

В результате анализа данных [1; 8; 9; 14] были установлены шесть специальных методов диагностирования зарождающихся эксплуатационных дефектов:

- метод ударных импульсов;
- метод спектрального анализа амплитудной огибающей вибросигнала на резонансной частоте датчика (резонансный метод);
- метод формирования n -мерного вектора кратных гармоник спектра огибающей вибросигнала на резонансной частоте узла механизма;
- метод формирования n -мерного вектора кратных гармоник спектра огибающей вибросигнала в окрестностях основных частот возбуждения механизма;
- обнаружение зарождающихся дефектов по величине коэффициента эксцесса;
- метод выделения когерентной составляющей.

Анализ источников [1; 3; 8-9; 10-13; 16] позволил установить характерные фазы проявления дефектов для 4-тактного двигателя [2], а также спектральные области проявления дефектов [2].

В источнике [14] содержится утверждение о том, что зарождающиеся эксплуатационные дефекты, обладающие малой колебательной мощностью, удастся диагностировать лишь при обращении к высокочастотным акустическим колебаниям в резонансных зонах механической системы в диапазоне частот $1-2 \text{ кГц} \leq f \leq 10-20 \text{ кГц}$ или при обращении к колебаниям в зарезонансной области $20 \leq f \leq 200-500 \text{ кГц}$ на собственной частоте встроенного вибропреобразователя. В диагностике зарождающихся дефектов предпочтительны методы анализа нестационарной компоненты колебательного процесса, а также методы, базирующиеся на анализе нелинейных свойств колебательной системы диагностируемого объекта.

Из приведенных выше данных следует, что зарождающийся дефект проявляется мерцательно, т.е. нестационарно, и эту нестационарность необходимо своевременно распознавать, прежде чем эксплуатационный дефект пройдет все стадии формирования (инкубационный период) и выйдет на поверхность.

Высокую результативность можно получить при обращении к высокочастотным акустическим колебаниям в резонансных зонах механической системы или к колебаниям в зарезонансной области на собственной частоте встроенного вибропреобразователя, что гораздо сложнее. Данный подход, по мнению авторов, базируется на использовании пьезоэлектрическо-

го сенсора, у которого спектральная полоса чувствительности очень мала и крайне узка. Поэтому для детектирования дефектов, обладающих малой колебательной мощностью, необходимо преобразовать их спектр (или подстроить) к рабочему спектру чувствительного пьезоэлемента, т.е. к его резонансной частоте.

В ходе выполнения данных научных исследований использовались не пьезоэлементы, а значительно более широкополосные, при этом несколько более низкочастотные MEMS-датчики на основе микропружинной связи. Поэтому не возникало необходимости в преобразовании частоты в окolorезонансную частоту для сенсора. В целом, следует отметить, что MEMS-сенсоры не работают на таких частотах (верхнее значение составляет порядка 1,6 кГц). Авторами также предложен новый подход в распознавании зарождающихся дефектов, а именно: анализ степени размытости спектральных линий вибросигнала.

В рамках гранта Президента Республики Беларусь в сфере науки на 2024 год в лаборатории технического сервиса топливной аппаратуры и агрегатов гидросистем БГАТУ был выполнен комплекс научно-исследовательских работ по тестированию форсунок CRIN2 автотракторных дизелей различной наработки (в том числе и новой форсунки) и последующему анализу их вибрационных характеристик.

На специализированном диагностическом стенде CR-Jet 4E (Dieselland) с использованием разработанной многоканальной измерительной системы с гибкой структурой [4; 15] проходили испытания форсунки CRIN2 (Bosch, типовые номера 0445120141 и 0445120074) на всех режимах нагружения. Вибродатчики MPU9150 и MPU9250 жестко крепились на корпусе форсунок клейкой лентой и дополнительно специальным стяжным хомутом (рис. 2), а для акустики использовался цифровой миниатюрный MEMS-микрофон INMP621. В дальнейшем выполнялся анализ полученных вибрационных характеристик.

На каждом этапе нагружения (тестирования) форсунки формировался соответствующий протокол.

Этапы тестирования:

1) проверка гидроплотности форсунки (LEAK TEST). Тест гидроплотности состоит в измерении времени изменения давления от одного порога до другого. Задаются два порога давления: верхний и нижний. Время снижения давления от верхнего до нижнего порога отображается на дисплее;

2) тестирование форсунки при максимальной нагрузке (VL);

3) тестирование форсунки при средних нагрузках или оценка экологичности, так называемая, «точка эмиссии» (EM);

4) тестирование форсунки на холостом ходу (LL);

5) тестирование предварительного впрыска топлива (VE1 и VE1).

Визуализация данных рабочих окон программы стенда в привязке к конкретному этапу тестирования (VL) представлена на рисунке 3.

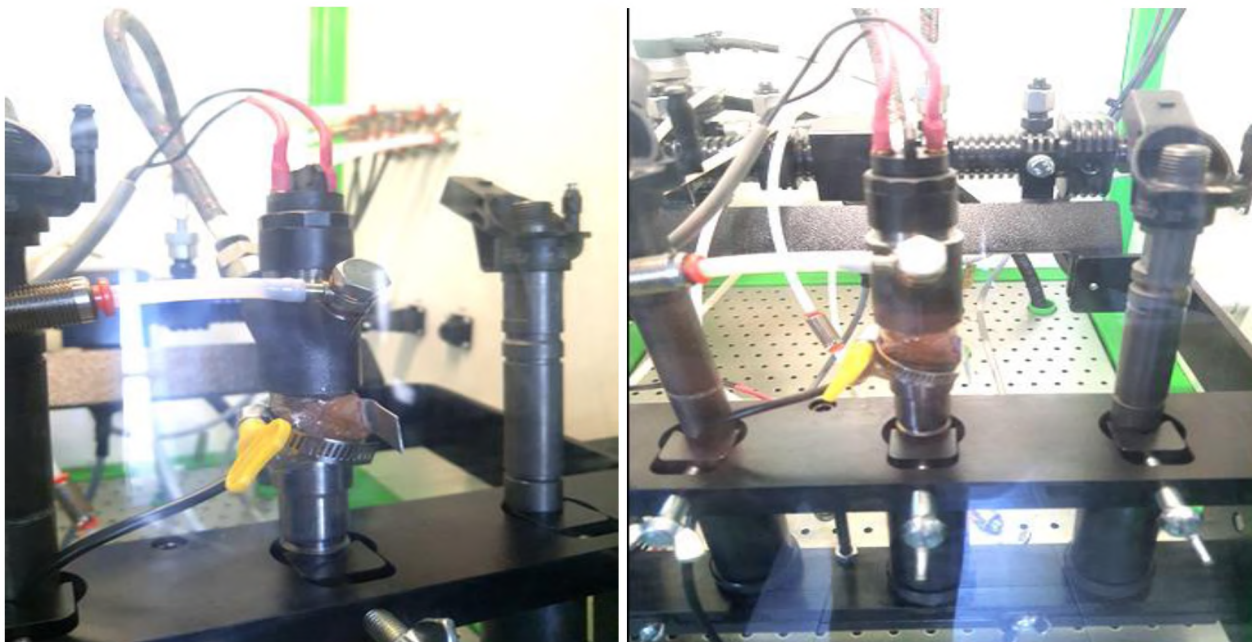


Рисунок 2. Испытуемая форсунка CRIN2 смонтирована на диагностическом стенде CR-jet 4E (Dieselland), датчик вибрации дополнительно прижат к корпусу форсунки стяжным хомутом

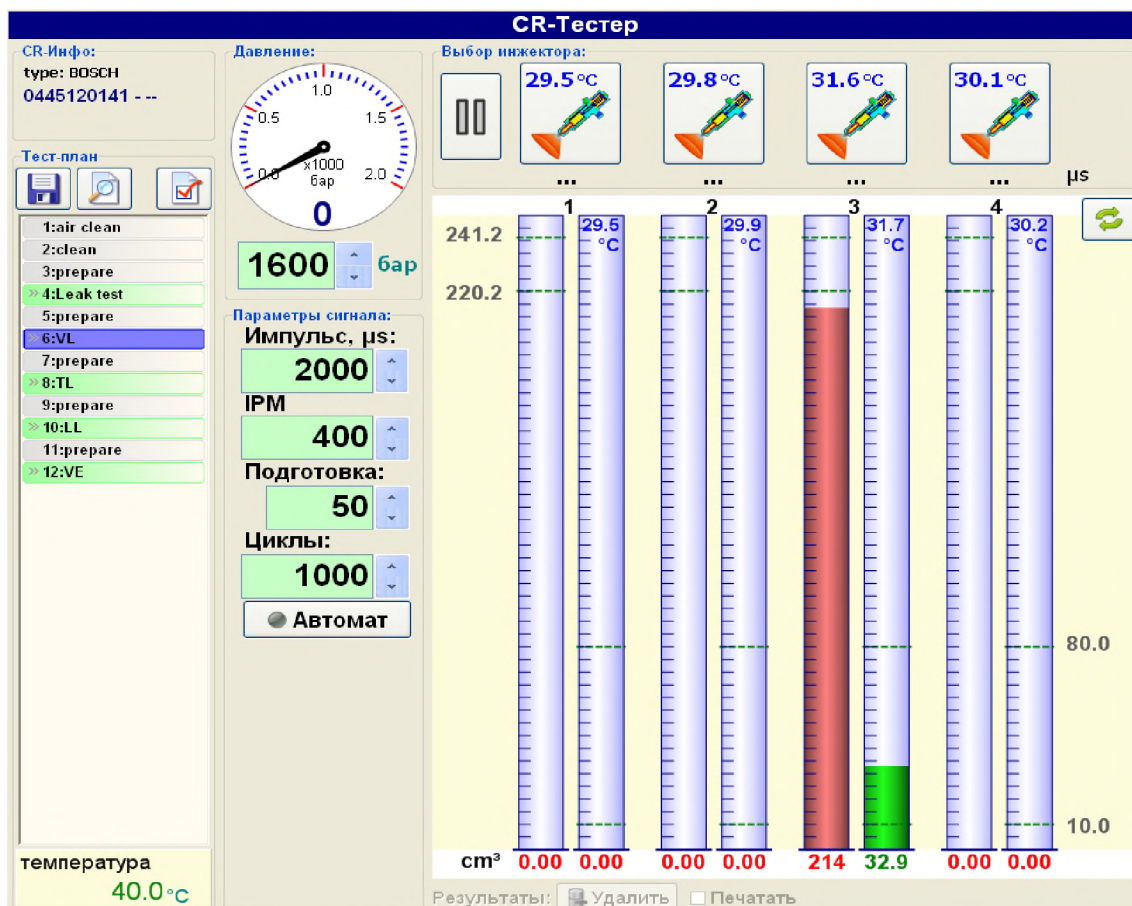


Рисунок 3. Рабочее окно программы стенда на режиме VL тестирования

Разработанная измерительная система отображает в режиме реального времени вибросигналы отно-

сительно системы координат хуz, создает амплитудно-частотную характеристику быстрым преобразо-

ванием Фурье. Система также сохраняет сигналы для их последующей вейвлет-обработки. Изначально они записывались в бинарные файлы с расширением «bin», а позднее – в wav-файлы, с фиксацией момента перехода на следующий тест-план. Температура форсунок фиксировалась, а их шум записывался в wav-файл [4].

Возможности диагностического стенда позволяют проводить тестирование четырех форсунок. Все необходимые адаптеры для подключения в лаборатории имеются. Однако во избежание разности подачи тестовой жидкости при нагружении тестированию подвергалась одна форсунка. Поэтому на всех представленных рисунках активной является секция под номером три, фактическое значение расхода тестовой жидкости указывается непосредственно под столбцом (к примеру, на рис. 3 значение расхода составляет $214 \text{ см}^3/1000$ циклов). На рабочем окне каждого из представленных этапов тестирования указаны пределы значений расхода, которые соответствуют нормальной работе исправной форсунки и рекомендованы производителем топливной аппаратуры данного поколения. На режиме тестирования LL таковыми пределами являются значения от 5,7 до $13,9 \text{ см}^3/1000$ циклов, на режиме TL – значения от 22,9 до $36,1 \text{ см}^3/1000$ циклов и так далее.

На основании проведенных исследований был сформирован массив данных, представленный в виде лабораторного журнала. Элементы массива данных упорядочены в зависимости от режима нагружения исследуемой форсунки с представлением проекций полученного сигнала на оси пространственной декартовой системы координат. Для каждого элемента набора данных выполнено преобразование Фурье, что позволяет выявить характерные изменения спектра сигнала для исправных и изношенных форсунок (рис. 4, 5). Для дан-

ных тестирования при максимальной нагрузке дополнительно выполнены вейвлет-преобразования и математическая обработка сигналов вибрации новой форсунки и форсунки, на ответственных деталях которой выявлены следы изнашивания. В совокупности массив данных лабораторного журнала и спектрограмм, полученных с использованием математического пакета MATLAB, формируют теоретико-практическую базу результатов анализа динамики спектральных, вейвлетных и статистических образов виброакустических сигналов форсунок поколения CRIN2.

Целью дальнейшего программного диагностирования топливных форсунок является выявление в вибросигнале выраженных гармоник с контролем их поведения, в чем и заключается новизна подхода при контроле [17]. Графическая интерпретация контроля выраженных гармоник вибросигнала представлена на рисунке 6.

Суть данного решения сводится к обработке спектрограмм (скейлограмм) как изображений методами цифровой обработки многомерных сигналов.

В качестве множества параметров контроля поведения гармоник (идентификационного вектора) вибросигнала выступают:

- количество выраженных гармоник в вибросигнале;
- номер (или частота) выраженной гармоники в вибросигнале (рис. 6);
- пиковые частоты в поведении выраженных гармоник во времени.

При вычислении идентификационного вектора параметров спектрограммы определяется множество данных, на основе которых однозначно можно распознать режим диагностирования (VL, TL, LL) и судить о состоянии топливной форсунки.

Для форсунок, на ответственных деталях которых выявлены следы изнашивания, характерен менее

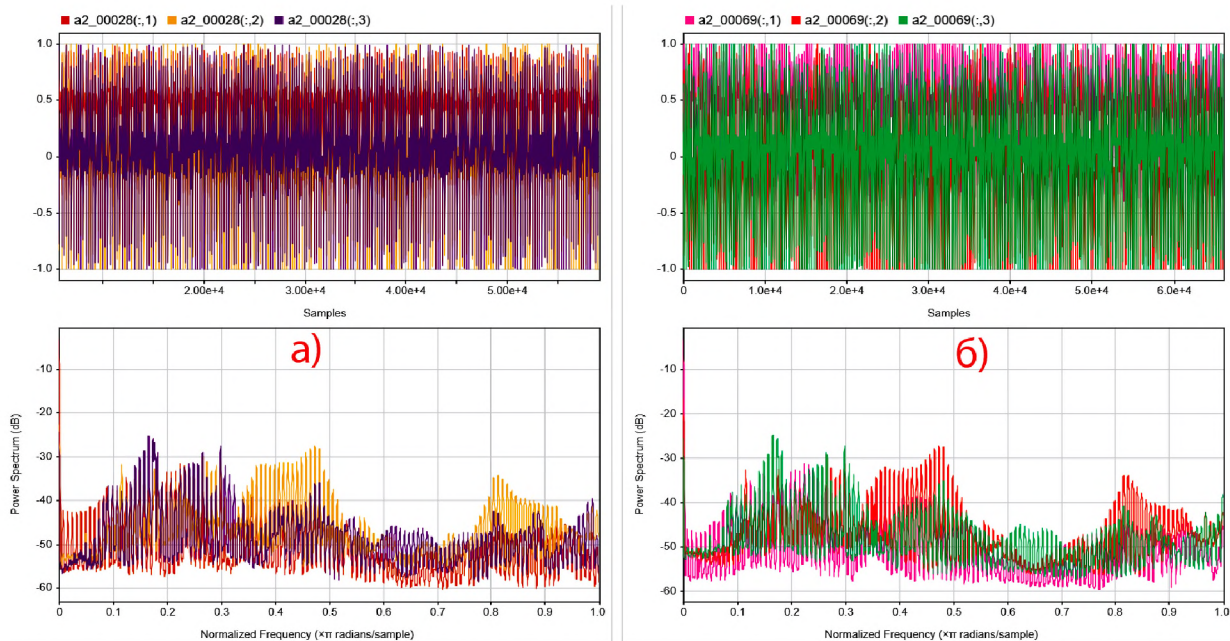


Рисунок 4. Результаты тестирования исправной форсунки (режим VL): а, б – исправная форсунка, первое испытание (1600 бар, импульс 2000 мкс, $i_{рт}$ 400, подготовка 50, циклы 1000, соударения)

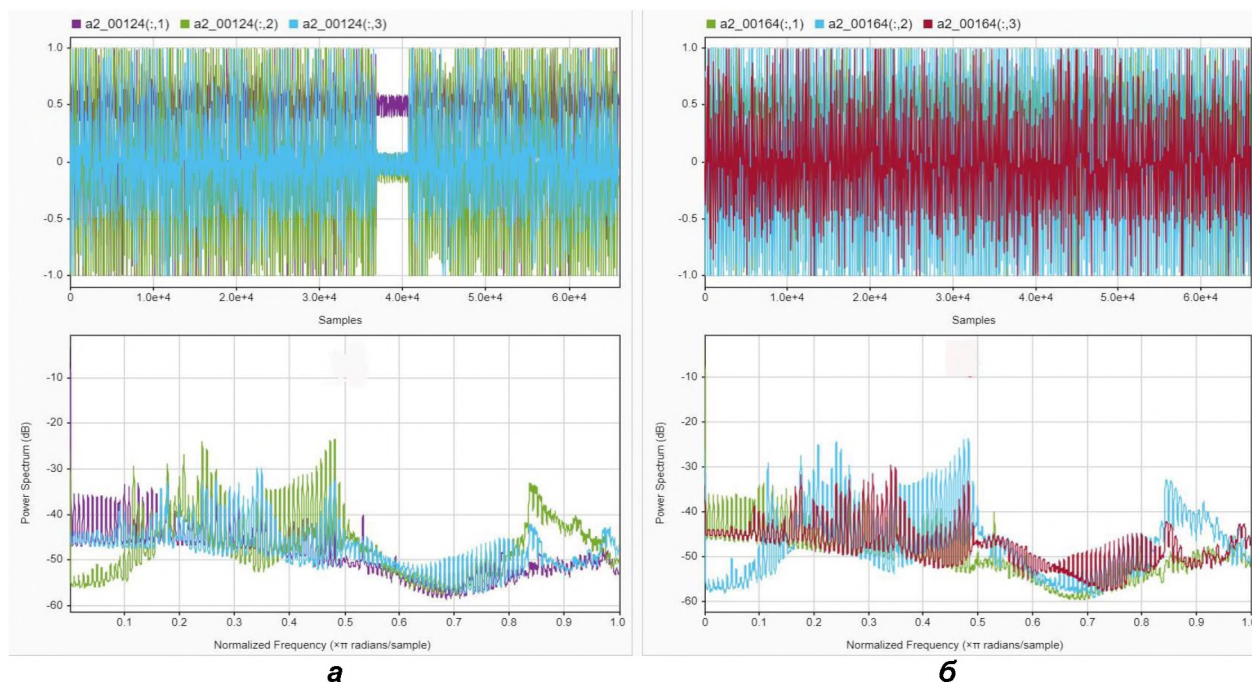


Рисунок 5. Результаты тестирования форсунки со следами износа: а, б – форсунка с умеренным износом посадочной поверхности клапана (режим VL)

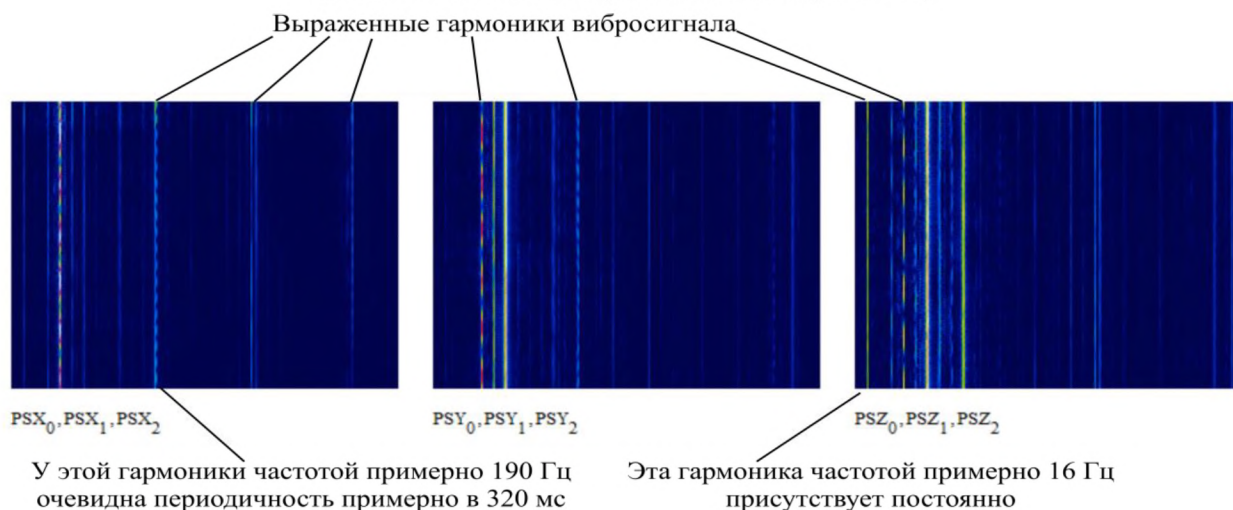


Рисунок 6. Графическая интерпретация контроля выраженных гармоник вибросигнала

выраженный спектр постоянства колебаний. На амплитудном спектре вибросигнала выявляются:

- на частоте 120 Гц – гидроудар при подаче топлива в полость форсунки;
- на частоте 100 Гц – интенсивные виброускорения при ударе иглы об упор посадочного места;
- на частотах 70-80 Гц – вибрации от факела впрыскиваемого топлива;
- на частоте 50 Гц – удар от заключительной посадки иглы в распылитель;
- на частоте 10-30 Гц – возмущения большой амплитуды, возможные из-за закоксовки сопловых отверстий форсунки. Последнее наблюдается и на вейвлет-образях виброускорений.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что методами обработки сигнала вибрации могут служить как спектрально-статистический анализ, так и вейвлет-преобразование. В целом, целесообразно сочетание базовых методов, алгоритмов и методик диагностирования узлов и деталей автотракторных двигателей.

Предложен технологический подход вибрационного диагностирования топливных форсунок с использованием разработанного многоканального прибора интегрированного виброакустического и теплового диагностирования и специализированного диагностического стенда.

В ходе программного диагностирования топливных форсунок разработан новый метод выявления в вибросигнале выраженных гармоник с контролем их поведения. Результат подхода формируется при обработке спектрограмм (скейлограмм) как изображений методами цифровой обработки многомерных сигналов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Балицкий, Ф.Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова, А.Г. Соколова [и др.]. – М.: Наука, 1984. – 119 с.
2. Тарасенко, В.Е. Использование методов функционального диагностирования автотракторных двигателей / В.Е. Тарасенко // Современные проблемы и пути развития технического сервиса в АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 5-6 июня 2024 г. / Белор. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: Л.М. Акулович [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2024. – С. 49-55.
3. Коновалов, А.И. Диагностируем на «Дельфине»: методич. пособие / А.И. Коновалов, О.Н. Лукьяненко. – Луганск, 2006. – 100 с.
4. Диагностирование многоканальной измерительной системой с гибкой структурой форсунок фирмы BOSCH / А.А. Жешко, В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич, А.В. Дунаев // Технический сервис машин. – 2021. – Т. 59. – № 1 (142). – С. 55-64.
5. Мигаль, В.Д. Техническая диагностика автомобильных двигателей: учеб. пособие: в 3 томах. Объекты и методы диагностирования / В.Д. Мигаль. – Харьков: Майдан, 2014. – Т. 1. – 459 с.
6. Мигаль, В.Д. Техническая диагностика автомобильных двигателей: учеб. пособие: в 3 т. / В.Д. Мигаль. – Харьков: Майдан, 2014. – Т. 2: Неисправности, параметры и средства диагностики. – 403 с.
7. Технология вибрационного диагностирования дизельных двигателей / В.И. Соловьев, В.И. Беляев, В.А. Мачнев [и др.]. – М.: ГОСНИТИ, 1979. – 41 с.
8. Мордасов, В.И. Лазерная виброакустическая диагностика дефектов многослойных конструкций: учеб. пособие / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова, С.А. Сорокина [и др.]. – Самара: СГАУ, 2008. – 80 с.
9. Ширман, А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А.Р. Ширман, А.Б. Соловьев. – М.: 1996. – 276 с.
10. Jorge Duarte-Forero. Failure analysis in single-cylinder diesel engine SK-MDF300 through acoustic emissions / Duarte-Forero Jorge, Sergio Andrés Ramón-Ramón, Guillermo Valencia-Ochoa // *Respuestas, Journal of Engineering Sciences*. – 2020. – 25 (2) May-August. – P. 83-90.
11. Elamin, Fathi. Fault Detection and Diagnosis in Heavy Duty Diesel Engines Using Acoustic Emission / Fathi Hassen Elamin // Doctoral thesis, University of Huddersfield. – November, 2013. – 265 p.
12. B. Ribbens, William. Incipient failure detection in bus engine components / William B. Ribbens, Mitra Naaseh // Center for Transit Research and Management Development University of Michigan Transportation Research Institute. – MARCH, 1987. – 71 p.
13. Chaitidis, G.D. Vibration Analysis of a Common Rail Diesel Engine using Biodiesel: A Case Study / G.D. Chaitidis, T.S. Karakatsanis, V. Kanakaris [et al.] // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. – 2019. – № 12 (5). – P. 167-175.
14. Генкин, М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
15. Тарасенко, В.Е. Результаты диагностирования форсунки CRIN2 дизеля трактора «Беларус-3522.5» / В.Е. Тарасенко, О.О. Мухля, М.Д. Бобриков, Д.Д. Попека // Проблемы и перспективы развития инженерной науки в АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию работы кафедры эксплуатации и ремонта машин инженерного факультета и 90-летию докт. техн. наук, профессора, почетного работника высшего профессионального образования Российской Федерации Зорина Александра Ивановича, г. Ижевск, 13-15 февр. 2024 г. / Удмурдский гос. аграрный ун-т. – Ижевск: УдГАУ, 2024. – С. 47-53.
16. Тарасенко, В.Е. Анализ вибрационных характеристик форсунок CRIN2 автотракторных дизелей / В.Е. Тарасенко // Аграрное образование и наука для агропромышленного комплекса: материалы республиканской науч.-практ. конф. (БЕЛАГРО-2024); редкол.: В.А. Самсонович (гл. ред.) [и др.]. – Горки: БГСХА, 2024. – С. 254-257.
17. Патент BY23682, МПК G01M 15/00, G06K 9/62 (2006.01). Способ идентификации дефектов двигателя внутреннего сгорания транспортной или тяговой машины: № а 20200037; заявлено 03.02.2020; опубл. 30.04.2022 / В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич; заявитель: Бел. гос. аграрн. техн. ун-т. – 7 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 21.02.2025