

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧЕСКОЙ БАЗЫ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ СПЕКТРАЛЬНЫХ, ВЕЙВЛЕТНЫХ И СТАТИСТИЧЕСКИХ ОБРАЗОВ ВИБРОСИГНАЛОВ ФОРСУНОК

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,

ведущ. науч. сотр. лаборатории системы машин и технического использования машинно-тракторного парка РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», канд. техн. наук, доцент

На основании результатов научно-исследовательской работы по испытанию форсунок CRIN2 автотракторных двигателей различной наработки на диагностическом стенде и анализа их вибрационных характеристик выполнено разложение исходного сигнала на уровни и регистрация амплитуд колебаний, определены характерные частоты колебания элементов форсунки. В совокупности массив данных спектрограмм, полученных с использованием математического пакета MATLAB, формирует теоретико-практическую базу результатов анализа динамики спектральных, вейвлетных и статистических образов вибросигналов форсунок поколения CRIN2.

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

Based on findings of experimental research involving vibration analysis of CRIN2 injectors of automotive and tractor engines with varying operating hours using a dedicated diagnostic test bench, original signal decomposition into constituent levels was performed, vibration amplitudes were recorded and characteristic vibration frequencies of injectors' components were identified. In total, the data array of spectrogram obtained with the use of the MATLAB mathematical package form the theoretical and practical basis for the results of analyzing the dynamics of spectral, wavelet and statistical images of vibration signals of CRIN2 generation injectors.

Key words: injector, stand, method, wear, sensor, signal, spectrum.

Введение

При вибрационном диагностировании форсунок поколения CRIN2 с электромагнитным управлением важно установить связь параметров выходного вибрационного сигнала со структурным параметром объекта, например, зазором в сопряжении иглы и корпуса распылителя, непосредственно характеризующим техническое состояние форсунки. Вибрационный процесс, возникающий при работе форсунки в соответствии с управляющими импульсами группы магнитов, является в основном следствием ударных взаимодействий импульсного характера. Ударный процесс имеет свой спектр, составляющие которого можно оценить, измеряя максимальные величины выходного сигнала, пропускаемого через ряд узкополосных фильтров с близкими частотами. Искажение спектра входного воздействия, вызываемое реакцией колебательной упругой системы топливной форсун-

ки, передающей сигнал к вибропреобразователю, а также влияние на сигналы исследуемого сопряжения других сопряжений затрудняют поиск однозначной связи параметров сигнала с параметрами технического состояния диагностируемых механизмов [1].

При диагностировании топливной аппаратуры эффективным является использование характеристик виброакустического диапазона [2, 3] в связи с небольшими искажениями спектра и приемлемым отношением сигнал/помеха. Поскольку интенсивность удара определяется его кинетической энергией, то для повышения информативности диагностирования целесообразно связать параметры диагностического сигнала с энергией виброударного процесса [1].

Современные MEMS датчики, как и широко используемые пьезоакселерометры, имеют высокую чувствительность к ускорению колебаний. Фильтрацию колебательного процесса следует производить в узкой полосе ультразвукового диапазона частот. Это-

му требованию в максимальной степени соответствует область резонанса акселерометра.

Несмотря на малую интенсивность высокочастотных составляющих спектра воздействия, сигнал на выходе фильтра после вибропреобразователя составляет десятки и сотни милливольт даже при начальных состояниях механизмов (рис. 1). С увеличением зазоров в кинематических парах уменьшается длительность соударения, что ведет к перераспределению энергии в спектре воздействия и увеличению интенсивности высокочастотных составляющих и повышает чувствительность метода [1; 4].

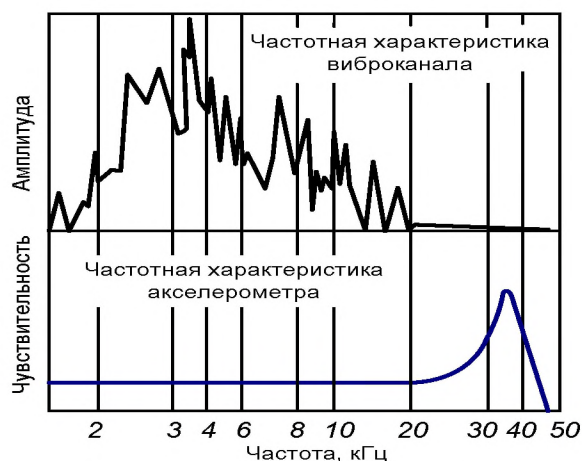


Рисунок 1 Формирование выходного вибрационного отклика от ударного воздействия в механизме

Широкую известность получил метод диагностирования механизмов двигателя по параметрам виброударных импульсов, разработанный сотрудниками лаборатории автоматизированных систем диагностирования и прогнозирования машин ГОСНИТИ В.И. Соловьевым, В.И. Беляевым и В.А. Мачневым, а также сотрудниками ОКБМ при заводе «Эллар» А.К. Берзиньш и Л.Ф. Захаренко под общим руководством В.М. Михлина [1]. Особенности диагностирования поршневых двигателей внутреннего сгорания изучались М.Д. Генкиным, А.Г. Соколовой, Ф.Я. Балицким [5, 6]. Механизм возникновения виброакустических процессов в работающей форсунке рассмотрен в работах Е.А. Никитина, Л.В. Станиславского, Э.А. Улановского и других. [7]. Известны также работы последних лет по цифровой обработке вибрационных сигналов [8, 9].

Целью настоящей работы является формирование теоретико-практической базы результатов анализа динамики спектральных и статистических образов вибросигналов форсунок CRIN2 с электромагнитным управлением.

Основная часть

В лаборатории технического сервиса топливной аппаратуры и агрегатов гидросистем БГАТУ с использованием многоканальной измерительной системы с гибкой структурой (рис. 2) [4; 10, 11], диагностических стендов CR-JET 4E компании Dieselland и

Поток SMART CRI-2F (ООО «Автоприбор») выполнен комплекс экспериментальных работ по измерению вибрации топливных форсунок на всех режимах нагружения [12]. Объектами исследования выступали форсунки CRIN2 автотракторных дизельных двигателей с электромагнитным управлением (Bosch, типовой номер 0445120141) различной наработки со следами изнашивания наиболее ответственных деталей [12, 13], а также две новые форсунки. В дальнейшем выполнялся анализ их вибрационных характеристик.

Тестирование форсунок CRIN2 осуществлялось в соответствии с проверочными режимами программного обеспечения диагностического стенда при давлении впрыска в них 25, 100 и 160 МПа. При этом вибродатчики MPU9150 и MPU9250 крепили жестко на корпусе форсунок (изначально клейкой лентой и дополнительно специальным стяжным хомутом). Для акустических исследований была создана возможность использования цифрового миниатюрного MEMS-микрофона INMP621.

В ходе исследования была значительно усовершенствована многоканальная измерительная система с гибкой структурой (далее – диагностический прибор), которая отображает в режиме реального времени вибросигналы относительно системы координат хуэ, создает амплитудно-частотную характеристику быстрым преобразованием Фурье. Разработан программный многоканальный драйвер цифровых датчиков вибрации [14], входящих в состав диагностического прибора. Создана возможность считывания и записи данных одновременно с трех датчиков вибрации. Выполнение данной операции позволяет реализовать временной период применяемого датчика

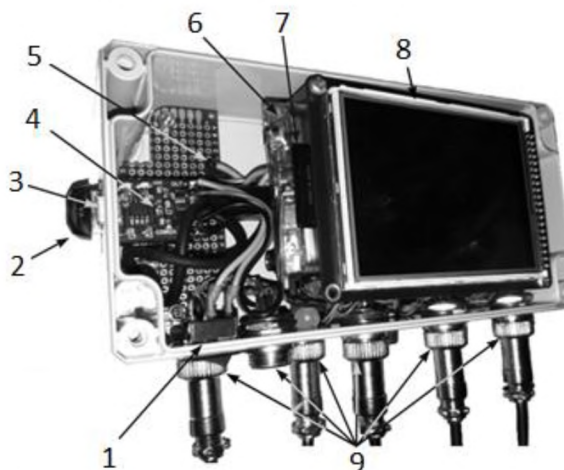


Рисунок 2. Детализированный вид многоканальной измерительной системы со стороны пользователя: 1 – выключатель; 2 – USB-разъем для flash-диска и связи с внешними устройствами; 3 – microUSB-разъем внешнего питания и заряда аккумулятора; 4 – модуль внешнего питания и заряда аккумулятора; 5 – разъем загрузки программ и отладки; 6 – литий-полимерный аккумулятор; 7 – SD-карта; 8 – дисплейный модуль с сенсорной панелью; 9 – разъемы подключения датчиков вибрации

MPU9150 / MPU9250 с предельной частотой обновления данных, равной 1000 отсчетов/с. Датчик вибрации можно подсоединять «на ходу» при работающем диагностическом приборе, а сохраняемый на USB flash-диске файл данных имеет стандартный общеизвестный wav-формат, легко обрабатываемый любым современным программно-математическим пакетом. Диагностический прибор сохраняет сигналы для их последующей вейвлет-обработки. Фиксировали также температуру форсунок, а непосредственно вибросигналы записывали в wav-файл [3; 15].

На каждом этапе нагружения форсунки формировался соответствующий протокол тестирования. Визуализация данных рабочих окон программы стенда в привязке к отдельным этапам тестирования представлена на рисунке 3.

Во избежание разности подачи тестовой жидкости при нагружении одновременно тестированию подвергалась одна форсунка. На всех представленных рисунках активной является секция под номером три (рис. 3), фактическое значение расхода тестовой жидкости указывается непосредственно под столбцом (к примеру, на рисунке 3а значение расхода составляет 9,43 см³, а на рисунке 3б – 33,4 см³/1000 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 см³/1000 циклов, на режиме TL – значения от 22,9 до 36,1 см³/1000 циклов и так далее [12].

При тестировании форсунки со следами изнашивания цилиндрической поверхности штока управляющего клапана (мультипликатора) и посадочного места шарика запорного клапана [12] на режиме VL (рис. 3в) значение подачи тестовой жидкости составляет 214 см³/1000 циклов и не попадает в установленные допустимые пределы (220,2-241,2 см³/1000 циклов). Значение расхода тестовой жидкости через магистраль обратного слива при таких же условиях нагружения составляет 32,9 см³/1000 циклов, что полностью соответствует допустимым значениям, равным (10,0-80,0 см³/1000 циклов).

Следует отметить, что при эксплуатации дизельного двигателя, на котором

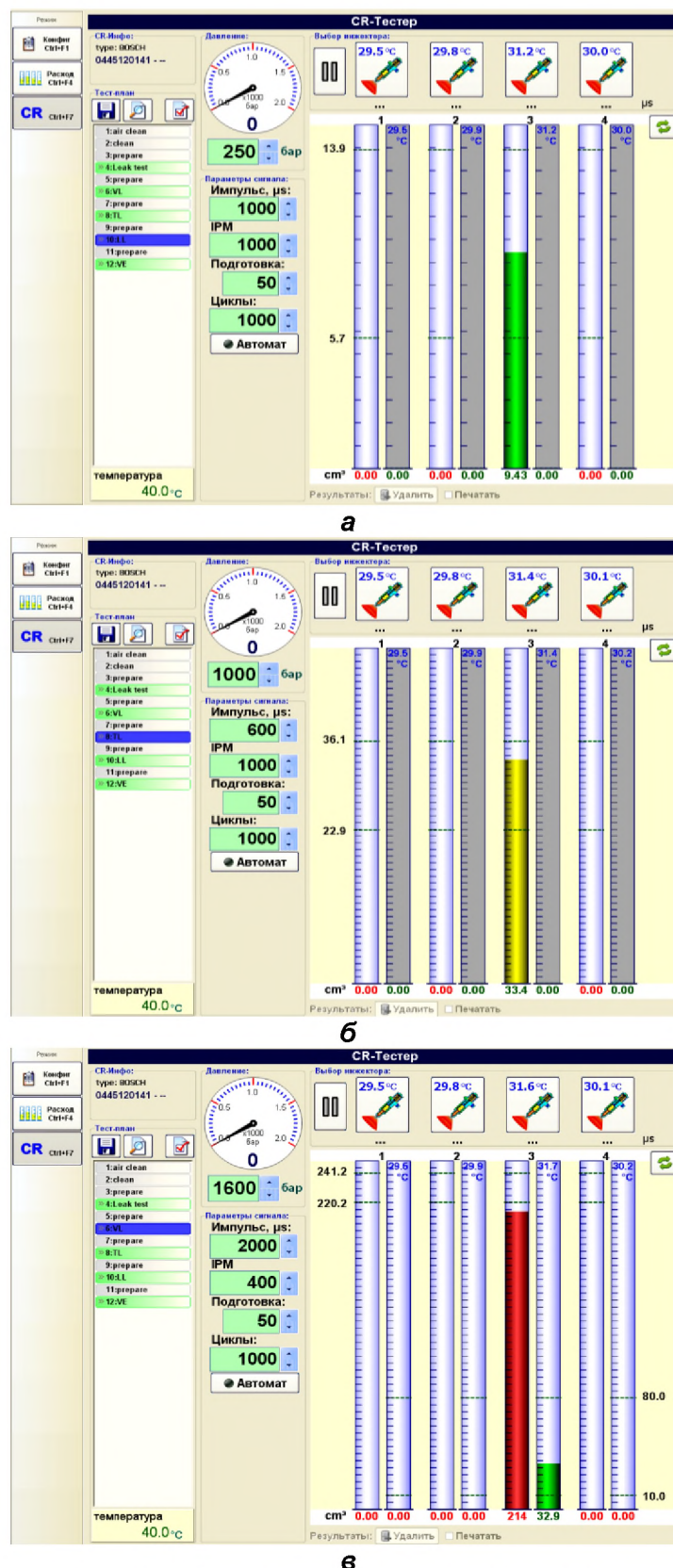


Рисунок 3 Рабочее окно программы стенда на режиме тестирования LL (а), режиме TL (б) и режиме VL (в)

установлены форсунки подобного технического состояния, какие-либо весомые отклонения в работе наблюдаться не будут. Однако форсунка, на ответственных деталях которой выявлены следы такой невысокой степени изнашивания, явилась предметом нашего исследования с целью раннего и достоверного определения технического состояния и фиксации зарождающихся дефектов, как на поверхности ответственных деталей топливной аппаратуры, так и внутренних дефектов в структуре металла.

На основании проведенных исследований сформирован массив данных в виде лабораторного журнала (фрагмент таблицы данных при тестировании форсунки CRIN2 в режиме холостого хода (LL) представлен в таблице 1). Массив вибросигналов вводился в таблицу: первые три её столбца – амплитуды вибраций форсунки относительно осей X Y Z, а четвертый – значения опорной гармоника, предназначенной для подтверждения неразрывности множества полученных данных.

Все измерения проводились многократно, получено множество бинарных файлов сигналов акселерометров, как для форсунок, на ответственных деталях которых выявлены следы изнашивания, так и для форсунок без следов изнашивания. Предобработка сигналов проводилась в системе Mathcad (рис. 4, 5), а последующий спектральный анализ и вейвлет-преобразования – с использованием пакета программ MATLAB.

По видам спектрограмм различимы режимы диагностирования: VL, TL, LL. Наиболее явные изменения спектров в сравнении с исправной (новой) и изношенной форсункой наблюдаются на режимах VL (самая весома разница) и TL (рис. 4, 5). На представленных в

одном ряду изображениях указаны подписи PSX, PSY и PSZ, где важен последний символ, указывающий на ось X, Y или Z. Это обусловлено использованием при исследовании трехосевого акселерометра.

Элементы массива упорядочены в зависимости от режима нагружения исследуемой форсунки с представлением проекций полученного сигнала на оси пространственной декартовой системы координат [12]. Для каждого элемента набора данных выполнено преобразование Фурье, что позволяет выявить характерные изменения спектра сигнала для исправных и изношенных форсунок.

Для данных тестирования при максимальной нагрузке дополнительно выполнены вейвлет-преобразования и математическая обработка сигналов вибрации новой форсунки и форсунки, на ответственных деталях которой отмечены 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.

Основные пики вибросигналов форсунки, на ответственных деталях которой выявлены следы изнашивания, находятся в частотах 150 и 300 Гц. Пиковых импульсов меньше, чем у новой форсунки, а амплитуды в них более высокие (более 800 ед). Для новой форсунки пики по частотам распределены равномерно, а амплитуды меньше на 200 ед.

Таблица 1. Фрагмент таблицы данных по результатам тестирования форсунки CRIN2 (0445120141) в режиме холостого хода (LL), мкм/мкс

Проекция сигнала на оси декартовой системы координат			Гармоника
X	Y	Z	
0,554229736328125	-0,109527587890625	-0,0380249023437500	-0,00152587890625000
0,499755859375000	-0,0623779296875000	0,0321350097656250	0,0816345214843750
0,499755859375000	-0,0623779296875000	0,0321350097656250	0,0816345214843750
0,507751464843750	-0,0152893066406250	0,0868225097656250	0,0804748535156250
0,484313964843750	-0,0152282714843750	0,102447509765625	0,0804748535156250
0,484313964843750	-0,0152282714843750	0,102447509765625	0,0792846679687500
0,491973876953125	-0,0545043945312500	0,0477600097656250	0,0780944824218750
0,507476806640625	-0,0782470703125000	-0,0303649902343750	0,0780944824218750
0,507476806640625	-0,0782470703125000	-0,0303649902343750	0,0769042968750000
0,499694824218750	-0,0704345703125000	-0,0303649902343750	0,0756835937500000
0,460540771484375	-0,101531982421875	0,00869750976562500	0,0756835937500000
0,460540771484375	-0,101531982421875	0,00869750976562500	0,0744628906250000
0,491912841796875	-0,0701293945312500	0,0477600097656250	0,0744628906250000
0,491912841796875	-0,0701293945312500	0,0477600097656250	0,0732116699218750
0,476470947265625	-0,0231018066406250	0,0868225097656250	0,0719909667968750
0,468688964843750	-0,0152893066406250	0,0868225097656250	0,0719909667968750
0,468688964843750	-0,0152893066406250	0,0868225097656250	0,0707092285156250
0,468536376953125	-0,0544433593750000	0,0633850097656250	0,0694580078125000
0,499755859375000	-0,0547485351562500	-0,0147399902343750	0,0694580078125000
0,499755859375000	-0,0547485351562500	-0,0147399902343750	0,0681762695312500
0,515350341796875	-0,0626220703125000	-0,0303649902343750	0,0681762695312500
0,484100341796875	-0,0702819824218750	0,00869750976562500	0,0668640136718750

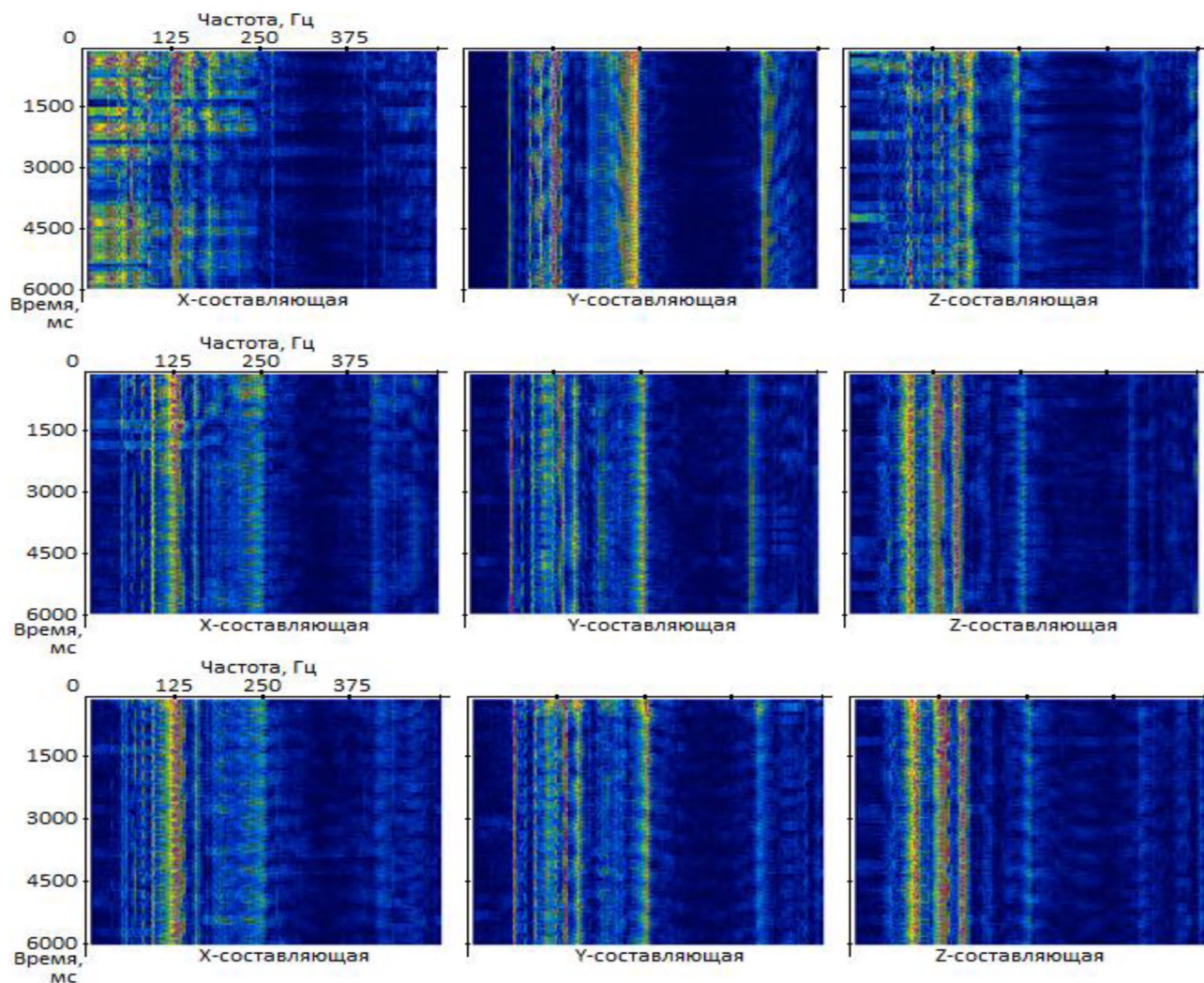
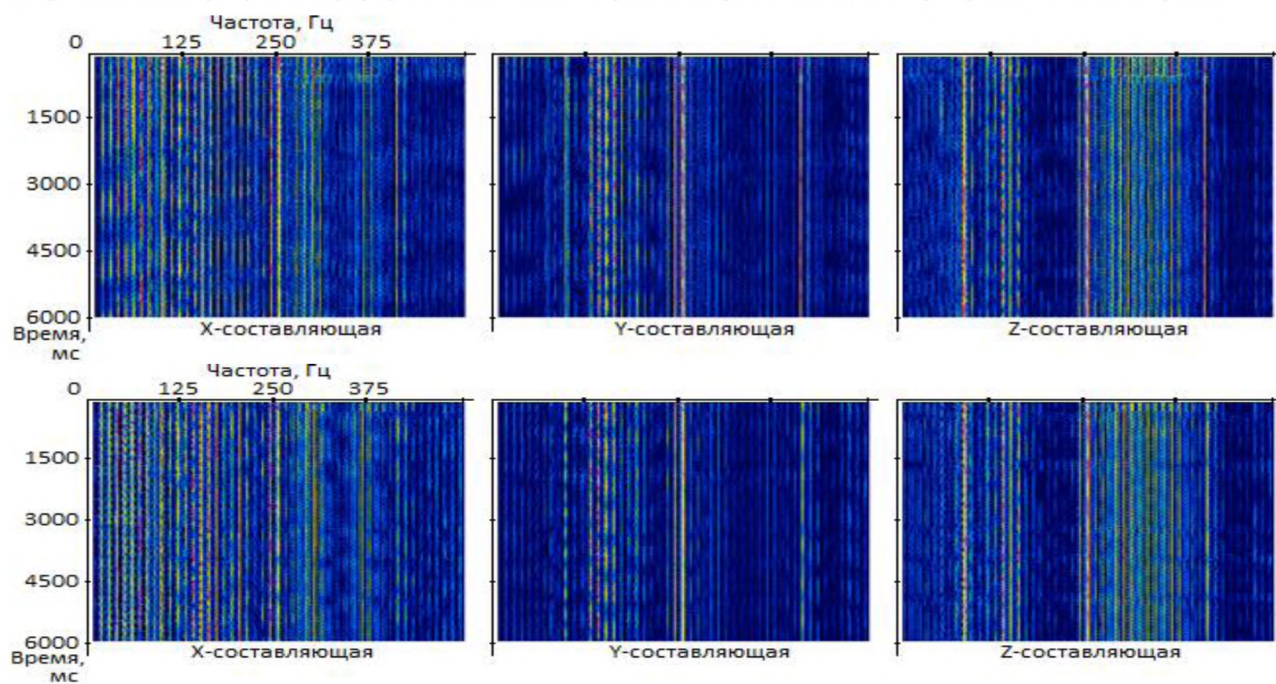


Рисунок 4. Спектрограммы форсунки с износом запорного конуса клапана и конуса распылителя на режиме VL



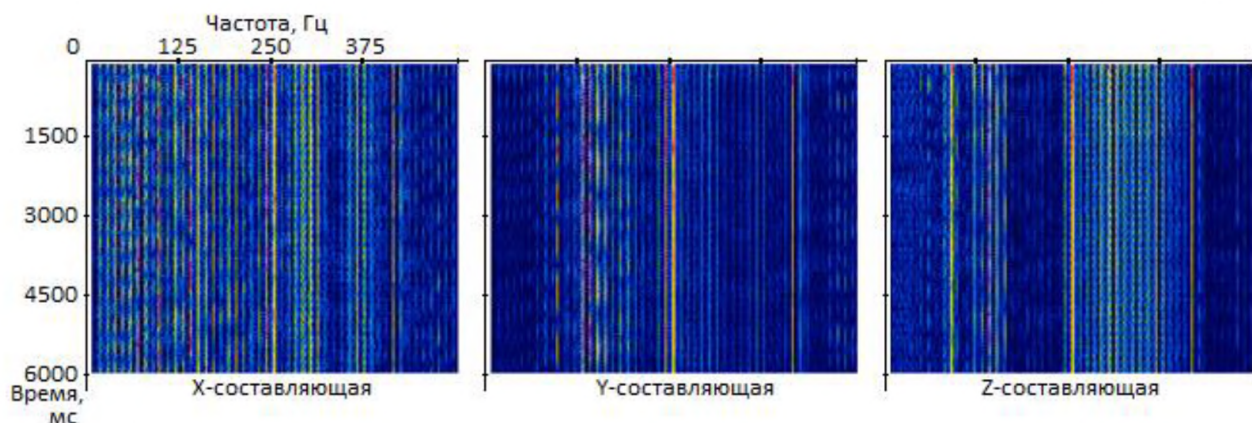


Рисунок 5 Спектрограммы форсунки с износом запорного конуса клапана и конуса распылителя на режиме TL

Дальнейшим шагом программного диагностирования топливных форсунок выступает выявление в вибросигнале выраженных гармоник с контролем их поведения. Новизна подхода при контроле подтверждена патентом на изобретение [16]. Суть данного решения сводится к обработке спектрограмм (скейлограмм) как изображений методами цифровой обработки многомерных сигналов.

Модель идентификации дефектов объекта форсунки по сигналу контролирующего датчика состоит в вычислении множества математических параметров сегментированных фрагментов, выделенных из совокупности образов преобразований исходного сигнала, именуемая аналитическим ансамблем.

Аналитический ансамбль сигнала представляет собой совокупность образов его преобразований, в качестве которых могут выступать: спектрограмма, гистограмма, рангограмма, скейлограмма, коррелограмма и др. Для априори периодического или квазипериодического процесса, к которым в частности относятся физические процессы в топливной форсунке, в качестве образа соответствующего сигнала логично использовать спектрограмму, динамика изменений которой порождает спектральный аналитический ансамбль.

В анализе случайной составляющей процесса, как правило, применяется гистограмма распределения плотности уровней сигнала, динамика изменений которой формирует статистический аналитический ансамбль.

Использование иных типов преобразований и соответствующих им аналитических образов зависит от природы процесса.

За основу модели идентификации дефектов форсунки CRIN2 принимается спектрально-статистический аналитический ансамбль, в состав которого, кроме спектрограммы и гистограммы, входят рангограмма как инструмент статистического анализа и скейлограмма, которая в большей степени относится к сфере спектрального анализа.

Заключение

Разработан программный многоканальный драйвер цифровых датчиков вибрации, входящих в состав многоканальной измерительной системы с гибкой

структурой. С использованием последнего, а также диагностического стенда CR-JET 4E и Поток CR2 выполнен комплекс экспериментальных работ по измерению вибрации топливных форсунок CRIN2 (0445120141) с электромагнитным управлением на всех режимах нагружения. На основании проведенных исследований сформирован массив данных, представленный в виде лабораторного журнала. Элементы массива 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 форсунок и форсунок, на ответственных деталях которых выявлены следы изнашивания.

Приведенные этапы научно-исследовательской работы позволили разработать методику формирования теоретико-практической базы результатов анализа динамики спектральных, вейвлетных и статистических образов вибросигналов форсунок поколения CRIN2.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Технология вибрационного диагностирования дизельных двигателей / В.И. Соловьев, В.И. Беляев, В.А. Мачнев [и др.]. – ГОСНИТИ. – М., 1979. – 41 с.
2. Тарасенко, В.Е. Исследование вибрации форсунок с помощью многоканальной системы с гибкой структурой / В.Е. Тарасенко, А.А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межведомственный тематический сборник / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2020. – Вып. 54. – С. 185-191.
3. Жешко, А.А. 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.
4. Тарасенко, В.Е. Особенности диагностирования форсунок с электромагнитным управлением /

В.Е. Тарасенко, С.К. Карпович // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 16-17 октября 2024 г.: в 2 ч. / редкол.: Н.Н. Романюк [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2024. – Ч. 2. – С. 28-31.

5. Генкин, М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

6. Балицкий, Ф.Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова, А.Г. Соколова [и др.]. – М.: Наука, 1984. – 119 с.

7. Никитин, Е.А. Диагностирование дизелей / Е.А. Никитин, Л.В. Станиславский, Э.А. Улановский [и др.]. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.

8. Бранцевич, П.Ю. Цифровая обработка вибрационных сигналов / П.Ю. Бранцевич. – Минск: Бест-принт, 2022. – 297 с.

9. Гундина, М.А. Спектральный анализ сигнала в системе Wolfram Mathematica / М.А. Гундина // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 2. – С. 173-178.

10. Ролич, О.Ч. Многоканальная интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики дизельных двигателей / О.Ч. Ролич, В.Е. Тарасенко // Агропанорама. – 2019. – № 5 (135). – С. 42-45.

11. Управление надежностью сельскохозяйственной техники методами диагностики и триботехники / В.П. Миклуш [и др.]; Мин-во сельского хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь; Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – Минск: БГАТУ, 2019. – 392 с.

12. Тарасенко, В.Е. Методы диагностирования зарождающихся эксплуатационных дефектов деталей авто-тракторных двигателей / В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич, А.А. Жешко // Агропанорама. – 2025. – № 2 (168). – С. 25-31.

13. Тарасенко, В.Е. Исследование состояния топливных форсунок CRIN2 дизельных двигателей / В.Е. Тарасенко, О.О. Мухля, А.В. Михолап // Агропанорама. – 2024. – № 6 (166). – С. 22-28.

14. Тарасенко, В.Е. Программный драйвер цифровых датчиков вибрации, входящих в состав многоканального прибора интегрированного виброакустического и теплового диагностирования / В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич, А.А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – 2025. – Вып. 58. – С. 305-312.

15. Тарасенко, В.Е. Анализ вибрационных характеристик форсунок CRIN2 автотракторных дизелей / В.Е. Тарасенко // Аграрное образование и наука для агропромышленного комплекса: материалы респуб. науч.-практ. конференции. «Белорусская агропромышленная неделя БЕЛАГРО-2024»; редкол.: В.А. Самсонович (гл. ред.) [и др.]. – Горки: БГСХА, 2024. – С. 254-257.

16. 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. 28.01.2022 / В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич; заявитель: Бел. гос. аграрн. техн. ун-т.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 05.05.2025

Радиоволновой влагомер зерна

Предназначен для непрерывного измерения влажности зерна в процессе сушки на зерносушильных комплексах.

Влагомер обеспечивает непрерывный контроль влажности зерна в потоке и автоматическую коррекцию результатов измерения при изменении температуры материала, имеет аналоговый выход – 4-20 мА, а также интерфейс – RS-485.



Основные технические данные

Диапазон измерения влажности зерна
Основная абсолютная погрешность
Температура контролируемого материала
Цена деления младшего разряда блока индикации
Напряжение питания
Потребляемая мощность

от 9 до 25 %
не более 0,5 %
от +5 до +65 °С
0,1 %
220 В 50 Гц
30 ВА