

В.Е. Тарасенко¹, А.А. Жешко²,

¹Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь
e-mail:trs9@yandex.ru

²РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»,
г. Минск, Республика Беларусь
e-mail:azeshko@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИИ ФОРСУНОК С ПОМОЩЬЮ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ГИБКОЙ СТРУКТУРОЙ

Проведены виброакустические исследования форсунок Bosch с помощью разработанного диагностического устройства (многоканальной системы с гибкой структурой) на стенде CR-Jet 4E. Выполнена обработка полученных сигналов с последующим спектральным анализом и вейвлет-преобразованиями.

Ключевые слова: виброакустика, диагностика, спектральный анализ, вейвлет-преобразования, многоканальная система, гибкая структура, форсунка.

V. E. Tarasenko¹, A. A. Zheshko²,

¹Belarusian State Agrarian Technical University
e-mail:trs9@yandex.ru

²RUP "NPC of the national Academy of Sciences of Belarus on agricultural mechanization",
Minsk, Republic of Belarus
e-mail:azeshko@gmail.com

STUDY OF INJECTOR VIBRATION USING A MULTI-CHANNEL SYSTEM WITH A FLEXIBLE STRUCTURE

Vibroacoustic studies of Bosch injectors were performed using a developed diagnostic device (multi-channel system with a flexible structure) on the stand CR-Jet 4E. The received signals were processed with subsequent spectral analysis and wavelet transformations.

Keywords: vibroacoustics, diagnostics, spectral analysis, wavelet transformations, multi-channel system, flexible structure, nozzle.

Введение

Основным назначением виброакустической диагностики является определение возможных неисправностей и прогнозирование ресурса. Средством, позволяющим осуществить измерения, является виброакустический сигнал, который мгновенно реагирует на изменение технического состояния. Таким образом, основной целью настоящих исследований является изучение информации, которая содержится в измеренном с помощью специально разработанного прибора сигнале [1, 2].

Доскональное изучение информации о состоянии узлов и агрегатов, которая содержится в сигнале, позволит в перспективе уточнить существующие методики диагностирования; установить точные границы, подтверждающие, что узел или агрегат неисправен; свести к минимуму неполноту и неопределенность информации.

Применительно к дизельным форсункам сигнал является обобщенным источником информации о различных колебательных процессах, что порождает вибрацию и акустические шумы.

Необходимо отметить, что вибрационные и акустические сигналы подвержены различного рода искажениям вследствие всевозможных шумов, чем объясняется их косвенный характер. Любой из снимаемых сигналов не предоставляет полноту информации. В этой связи основной методикой виброакустического диагностирования является построение упрощенных моделей колебаний и проведение значительного количества виброакустических исследований узлов и деталей с целью сбора статистической информации о вибрационных характеристиках на различных режимах работы.

Построение прогнозов о состоянии и остаточном ресурсе представляется возможным путем сопоставления статистических данных исправного и неисправного узлов.

Для обработки данных виброакустических исследований используются различные методики. Основным методом исследования является спектральный анализ, который позволяет качественно и количественно изучить информацию, предоставляемую виброакустическим сигналом. В рамках спектрального анализа целесообразно провести анализ пиков в спектре, определить их шаг. Также важным этапом обработки сигнала является определение его периодичности с помощью автокорреляции.

Основная часть

Результаты исследования виброакустических характеристик форсунок Bosch при фиксированном давлении

Исследования виброакустических характеристик форсунок Bosch проводились в лаборатории технического сервиса топливной аппаратуры и агрегатов гидросистем кафедры технологии и организация технического сервиса УО «БГАТУ».

Цель исследований: выявление отклонений виброакустических характеристик новой и выработавшей 50 % ресурса форсунок фирмы BOSCH.

Форсунки устанавливались на стенде CR-jet 4E (рис. 1). Давление при испытаниях поддерживалось постоянным и составляло 158 бар.



Рис. 1. Форсунки фирмы Bosh установленные на стенде для проведения исследований виброакустических характеристик

а) общий вид стенда для испытаний форсунок; б) исследуемые форсунки, установленные на стенде

Вибрационные характеристики форсунок исследовались с использованием датчиков, позволяющих фиксировать вибрации в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Оси, перпендикулярные плоскостям, относительно которых устанавливались датчики *хуэ*.

Для изучения акустических характеристик исследуемых форсунок использовался микрофон.

Измеренные сигналы передавались для обработки в специально разработанный прибор [1, 2, 3] для виброакустических исследований.

Прибор позволяет отображать (в режиме реального времени) измеряемые виброакустический сигналы относительно трехмерной системы координат *хуэ* с одновременной обработкой и отображением амплитудно-частотных характеристик сигнала, получением спектра вибрации путем быстрого преобразования Фурье.

Также прибор позволяет сохранять измеренные сигналы с целью их последующего изучения и анализа на компьютере.

Данные для изучения вибрации записывались в бинарные файлы с расширением bin. Вместе с сигналами вибраций также фиксировалась температура форсунок в момент испытаний. Данные снятые с микрофона и характеризующие акустические характеристики форсунок в момент испытаний записывались в wav-файл.

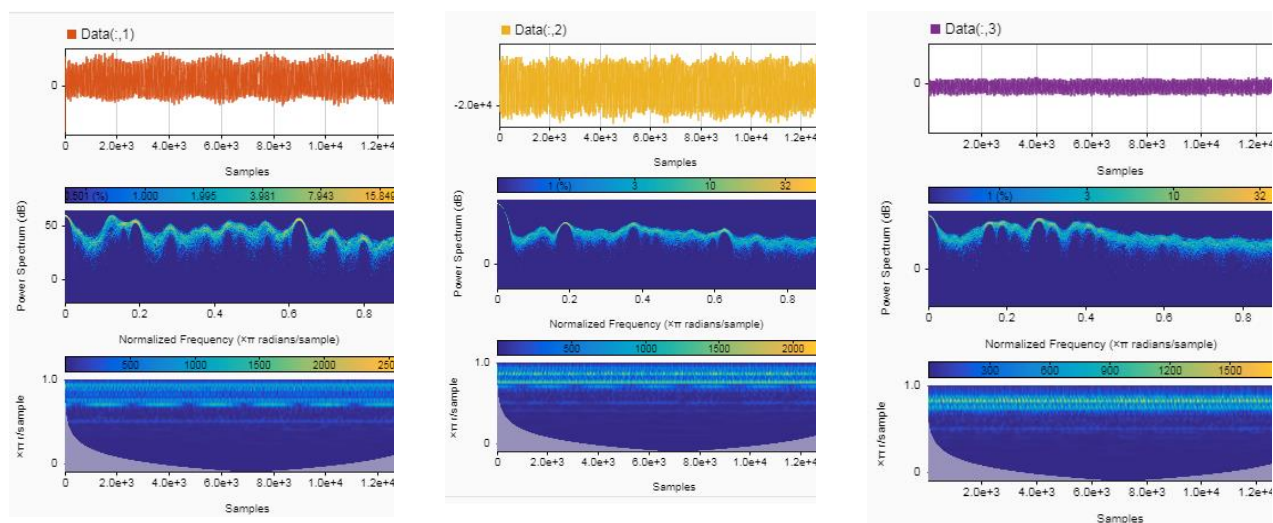
Измерения для новой и для изношенной форсунки измерялась в пятикратной повторности. В итоге было получено по пять файлов бинарных файлов с сигналами акселерометра, и пять звуковых файлов. Аналогично для изношенной форсунки получены сигналы с микрофона и сигналы акселерометра.

Полученный набор исходных данных представляет собой 4 массива. Первые три – данные о вибрации исследуемой форсунки относительно осей x y z . Четвертый массив – температура, фиксируемая в момент проведения измерений.

В верхней части каждого из рис. 2 и рис. 3 представлена снятая проекция сигнала акселерометра относительно одной из осей x y z . В средней части – спектр, построенный для нормализованной частоты сигнала (спектр постоянства сигнала), в нижней – скейлограмма сигнала.

Спектр постоянства сигнала (средняя часть графиков) является частотно-временным представлением сигнала и указывает на процент времени присутствия частоты в сигнале. Чем дольше частота по времени присутствует в сигнале, тем интенсивнее она отображается на спектре постоянства.

Исследования показали, что для изношенных форсунок характерен менее выраженный спектр постоянства колебаний относительно оси y .



а) проекция колебаний на ось x

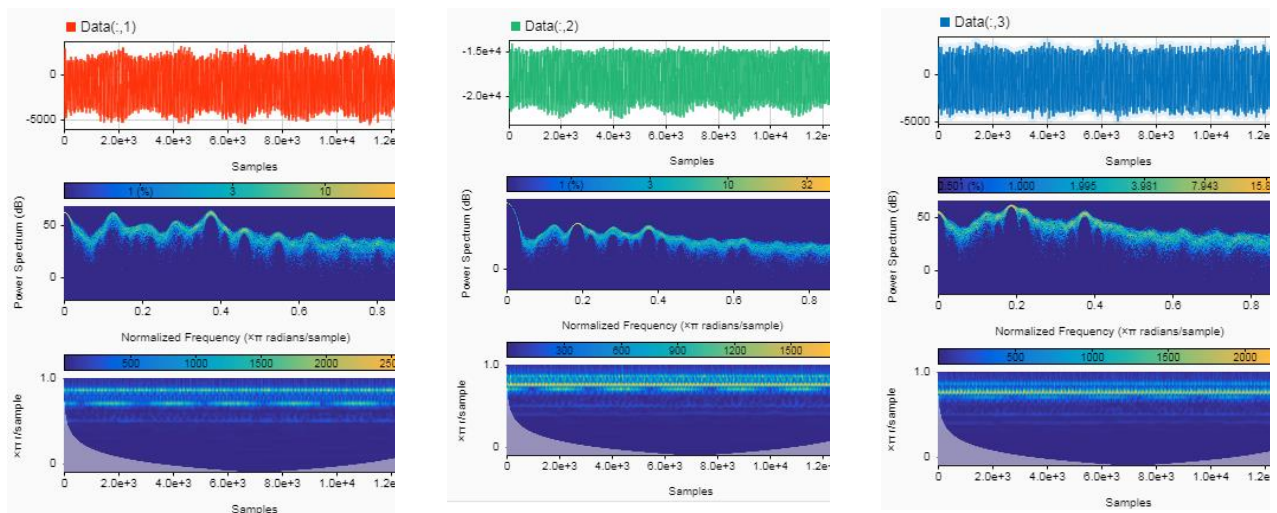
а) проекция колебаний на ось y

а) проекция колебаний на ось z

Рис. 2. – Результаты обработки проекций сигнала акселерометра на оси x y z на всем интервале измерений 0... 14339 (верхний график), спектр построенный для нормализованной частоты сигнала (график посередине) и скейлограмма сигнала (график снизу) для измерения новой форсунки

Скейлограмма – нижняя часть графиков – это абсолютные значения непрерывного вейвлет-преобразования сигнала. Данный вид обработки полезен при изучении сигналов с перемежающимися переходными процессами, которые могут возникать при износе узлов двигателя.

Из рис. 2 и рис. 3 видно: результаты обработки скейлограммы для изношенной форсунки выражены сильнее, чем для новой (относительно оси y).



a) проекция колебаний на ось x

a) проекция колебаний на ось y

a) проекция колебаний на ось z

Рис. 3. Результаты обработки проекций сигнала акселерометра на оси x, y, z на всем интервале измерений $0 \dots 14339$ (верхний график), спектр построенный для нормализованной частоты сигнала (график посередине) и скейлограмма сигнала (график снизу) для измерения изношенной форсунки акселерометром

Для определения частот, наиболее характерных для работы исправной и неисправной форсунок проводили спектральный анализ полученных при испытаниях сигналов (рис. 4 и рис.7).

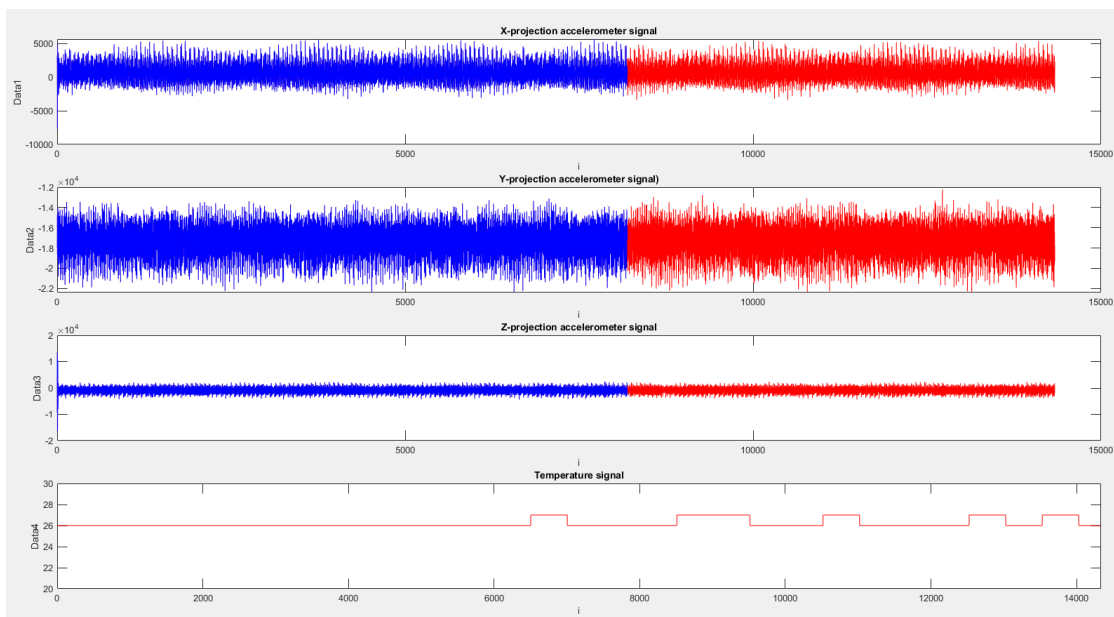


Рис. 4. Проекция сигнала x, y, z на всем интервале измерений (красный) и на интервале, выделенном для спектрального анализа (синий). Нижний график – колебания температуры на всем интервале измерений. Сигнал новой форсунки

На рис. 4 и рис. 6 представлены проекции сигнала x, y, z на всем интервале измерений (красный) и на интервале, выделенном для спектрального анализа (синий), для обоих вариантов форсунок. Нижний график – колебания температуры на всем интервале измерений.

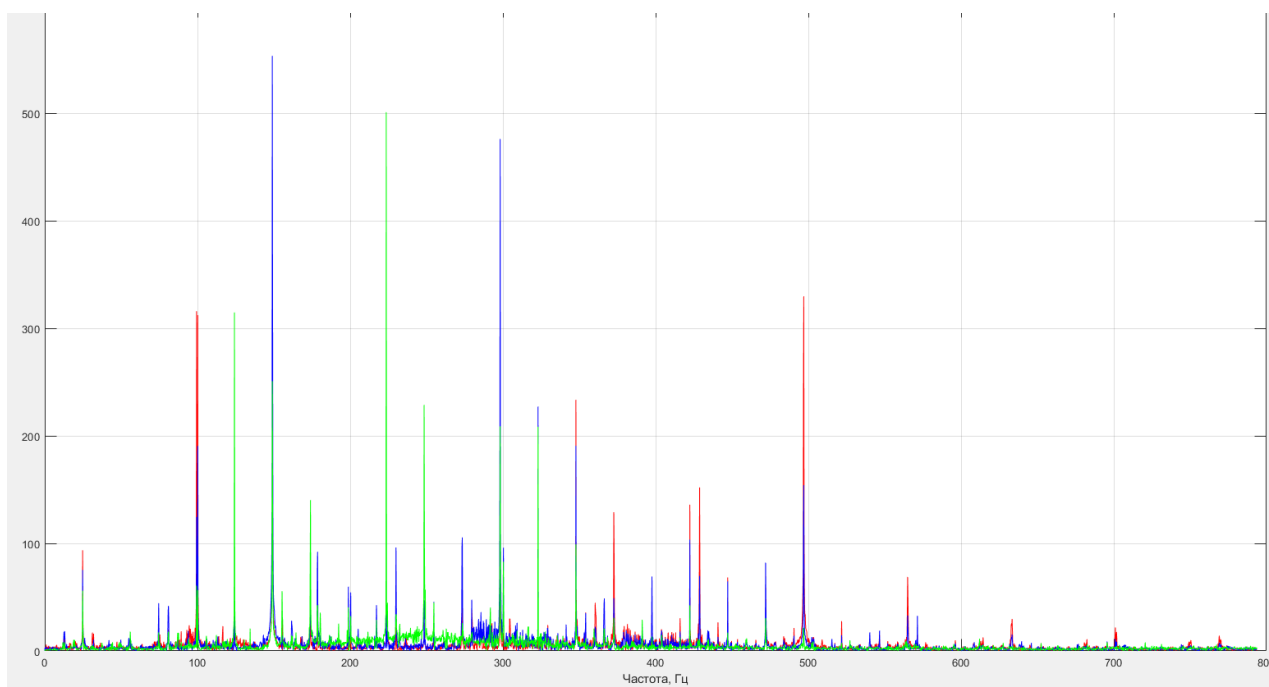


Рис. 5. Спектр новой форсунки

На рис. 5 и рис.7 представлены спектры вибраций для новых и изношенных форсунок.

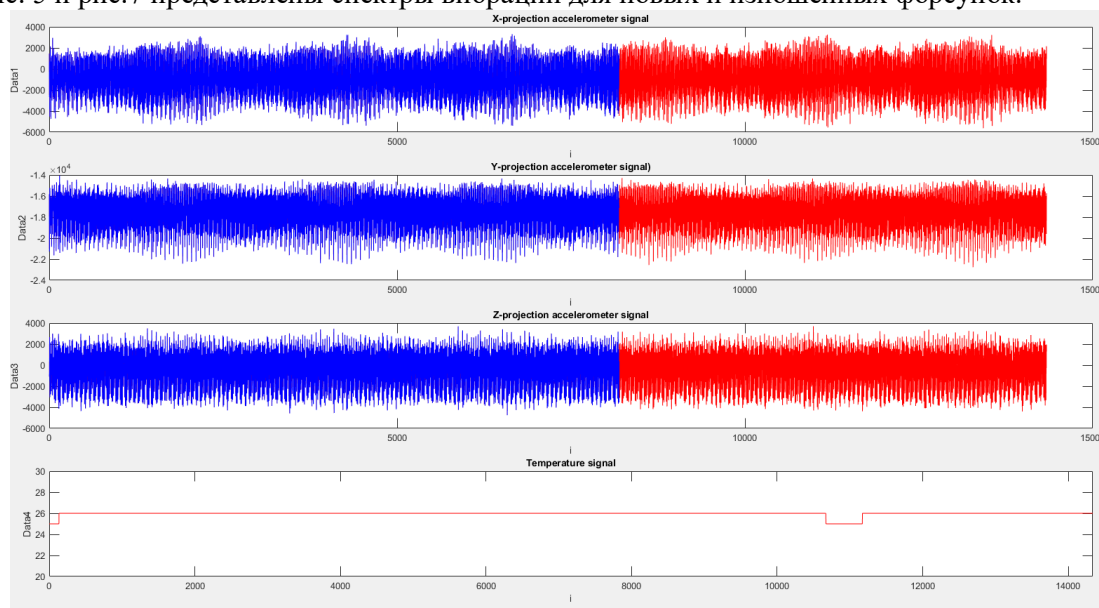


Рис. 6. Проекция сигнала xuz на всем интервале измерений (красный) и на интервале, выделенном для спектрального анализа (синий). Нижний график – колебания температуры на всем интервале измерений. Сигнал изношенной форсунки

Результаты анализа показали, что основные пики для изношенной форсунки находятся на частоте 150 и 300 Гц. Пиковых участков меньше чем у новой форсунки, а значения амплитуды в пиках высокие – более 800 единиц. Для новой форсунки пики более равномерно распределены по частоте и значения амплитуды меньше на 200 единиц в сравнении с изношенной форсункой.

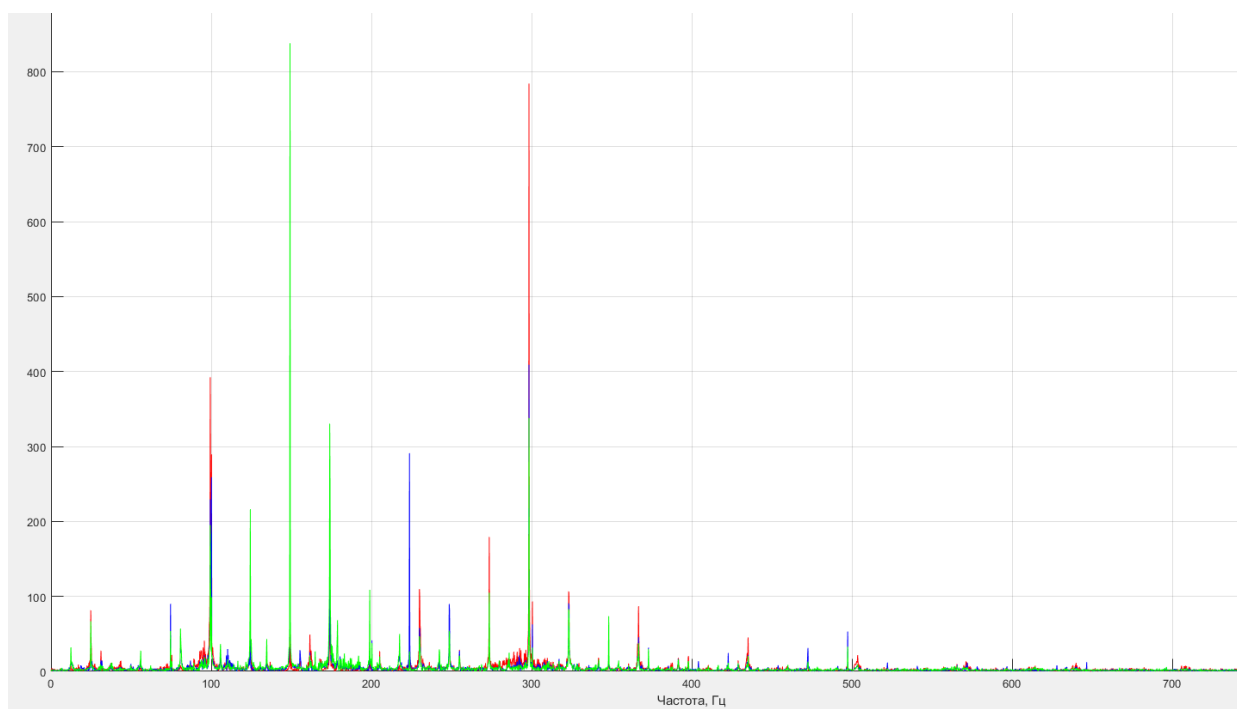


Рис. 7. Спектр изношенной форсунки

Аналогично проводилась обработка результатов измерения акустического сигнала. Результаты акустических исследований показывают, что амплитуда колебаний акустического сигнала для изношенной форсунки составляет порядка 150 единиц, в то время как новая форсунка работает тише – до 120 единиц на низких частотах – до 250 Гц. Звук работы форсунок для новой и изношенной форсунок на частоте 1000 Гц наоборот для новой – 80, для изношенной – 50.

В результате виброакустического анализа можно сделать вывод, что для диагностирования состояния форсунки можно использовать как акустический, так и вибрационный сигнал и по результатам их комплексной оценки судить об исправности.

Результаты исследования виброакустических характеристик форсунок при различных условиях работы

Для выявления закономерностей изменения спектра вибрации новой и изношенной форсунок при различных режимах работы двигателя в лаборатории технического сервиса топливной аппаратуры и агрегатов гидросистем УО «БГАТУ» были проведены дополнительные исследования виброакустических характеристик. Анализ полученных спектров показывает, что при включении компрессора, когда форсунка находится под минимальным давлением, вибрационные возмущения по амплитуде имеют минимальные значения. Для изношенной форсунки на частоте 200 Гц характерны большие по амплитуде возмущения, достигающие 10 единиц, для аналогичных условий у новой форсунки амплитуда не превышает 6 единиц.

При давлении 158 бар на частоте 150 Гц для новых и изношенных форсунок характерны аналогичные по амплитуде возмущения.

Аналогичные возмущения можно наблюдать на частоте 300 Гц, в то время как на частоте 500 Гц пики характерны только для изношенной форсунки.

При давлении 200 бар работа новой форсунки характеризуется равномерно распределенными на частотах 100–700 Гц пиками различной величины, в то время как распределение пиков с равными шагами характерно для интервала 200 – 500 Гц. У изношенной форсунки появляются дополнительные пики по амплитуде на частоте 300-400 Гц, которые не характерны для новой форсунки.

При давлении 1000 бар и выше у новой форсунки образуются два ярко выраженных пика на частотах 150 и 220 Гц.

Подводя итог, необходимо отметить, что полученные результаты являются обобщением сравнительно небольшого количества опытов. Однако даже по результатам обработки имеющихся данных можно утверждать, что как вибрационный, так и акустический сигнал узлов и деталей объекта может быть использован для диагностирования технического состояния. При этом основными методами обработки сигнала должны служить как спектральный анализ, так и вейвлет-преобразования. Также важным элементом получения необходимой информации о техническом состоянии узлов и агрегатов является изучение виброакустических сигналов при различных режимах работы.

Заключение

В соответствии с разработанным планом исследований с помощью разработанного диагностического устройства (многоканальной системы с гибкой структурой) проведены виброакустические исследования форсунок Bosch на стенде CR-Jet 4E. Выполнена обработка полученных сигналов в системе Mathcad с последующим спектральным анализом и вейвлет-преобразованиями с использованием пакета программ MATLAB [4, 5, 6, 7], в результате чего отмечено, что для изношенных форсунок характерен менее выраженный спектр постоянства колебаний относительно оси u .

Список использованных источников

13. Ролич, О.Ч. Многоканальная интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики дизельных двигателей [Текст] / О.Ч. Ролич, В.Е. Тарасенко // Агропанорама. – 2019. – № 5. – С. 42–45.
14. Ролич, О.Ч. Интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики систем, узлов и механизмов дизельного двигателя на базе беспроводной mesh-сети [Текст] / О.Ч. Ролич, В.Е. Тарасенко, И.И. Балаш // Агропанорама. – 2019. – № 6. – С. 38–41.
15. Основы цифровой обработки сигналов: учеб. пособие / В. Г. Коберниченко ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 150 с.
16. Математические основы обработки сигналов. Практикум: учебное пособие / ОС. Вадутов ; Томский политехнический университет. – 3-е изд., испр. и доп. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 102 с.
17. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. – 3-е изд. — СПб. : БХВ-Петербург, 2011. — 768 с.
18. Дьяконов В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник.
19. Frequency Analysis of Vibrations of the Internal Combustion Engine Components in the Diagnosis of Engine Processes / Franciszek Tomaszewski, Grzegorz M. Szymanski / The archives of transport Vol. XXIV, 2012.