

процессами, которые могут возникать при износе узлов двигателя. Из рисунков 1–4 видно, что для форсунки со следами изнашивания наиболее ответственных ее составляющих компонентов результаты обработки скейлограммы относительно оси y выражены сильнее, чем для новой.

Для определения частот, наиболее характерных для работы новой форсунки и форсунки со следами изнашивания наиболее ответственных ее составляющих компонентов проводили спектральный анализ полученных при испытаниях сигналов (графические построения в статье не отражены).

Комплекс выполненных в лаборатории исследовательских работ позволил установить фактическое отклонение от эталонного состояния (новая форсунка) элементов рассматриваемой форсунки, а также описать характерные виды изнашивания наиболее ответственных составляющих компонентов форсунки (запорного клапана и иглы распылителя).

Литература

1. 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 «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2020. – Вып. 54. – С. 185–191.
2. Тарасенко, В.Е. Методика формирования теоретико-практической базы результатов анализа динамики спектральных, вейвлетных и статистических образов вибросигналов форсунок / В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич, А.А. Жешко // Агропанограма. – 2025. – № 4(170). – С. 28–34.

УДК 621.11

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОРСУНОК

А.В. Михолап, студент ФТС, **М.В. Новиков**, студент ФТС,
Научный руководитель: В.Е. Тарасенко, канд. техн. наук, доцент
*УО «Белорусский государственный аграрный технический
университет»,
г. Минск, Республика Беларусь*

Посредством исследования виброакустических характеристик деталей и сборочных единиц (узлов и агрегатов) машин определяют-

ся возможные их неисправности. Средством, позволяющим осуществить измерения, является виброакустический сигнал, который мгновенно реагирует на изменение технического состояния. Основной целью исследований является изучение информации, которая содержится в измеренном с помощью специальной аппаратуры сигнале [1, 2, 3].

Изучение информации о состоянии узлов и агрегатов, которая содержится в сигнале, позволяет уточнить существующие методики диагностирования, установить точные границы, подтверждающие, что узел или агрегат неисправен и свести к минимуму неполноту и неопределенность информации [1].

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

Вибрационные и акустические сигналы подвержены различного рода искажениям вследствие всевозможных шумов, чем объясняется их косвенный характер. Любой из снимаемых сигналов не представляет полноту информации. В этой связи основной методикой 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 [1].

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 [1].

Как показывают многие исследования [4, 7], с увеличением зазоров в кинематических парах уменьшается длительность соударения, что ведет к перераспределению энергии в спектре воздействия и увеличению интенсивности высокочастотных составляющих, а это, в свою очередь, повышает чувствительность аппаратуры (рисунок 1).

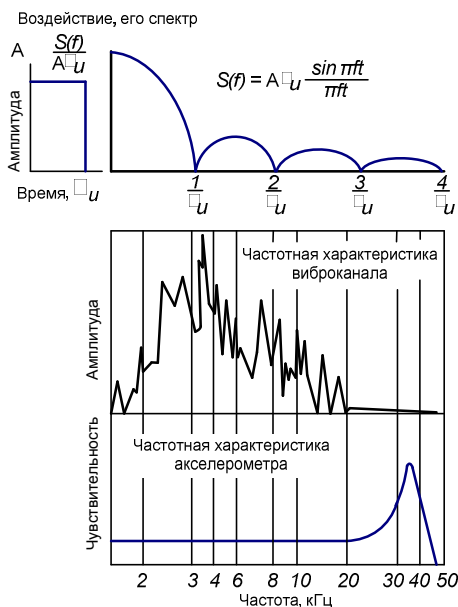
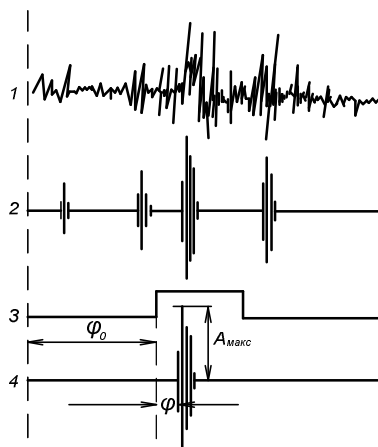


Рисунок 1 – Формирование выходного вибрационного отклика от ударного воздействия в механизме

В условиях резкого снижения уровня помех можно выделить импульсные сигналы малой длительности, соизмеримой с длительностью соударений, и максимальной амплитудой, соответствующей интенсивности соударения. Появляется возможность измерения с малой погрешностью фазового положения соударения, а его изменение относительно номинального использовать в качестве диагностического параметра. Важным при этом является появление возможности выделять и разделять виброударные импульсы от различных сопряжений механизма и применять временной способ разделения сигналов (рисунок 2) [4].

С использованием многоканальной системы с гибкой структурой (диагностического устройства) [2] на специализированном стенде CR-Jet 4E в лаборатории технического сервиса топливной аппаратуры и агрегатов гидросистем БГАТУ выполнены виброакустические исследования форсунок дизельных двигателей. Выполнен спектральный анализ полученных сигналов и вейвлет-преобразования с использованием пакета программ MATLAB.



1 – виброударный процесс без частотной селекции; 2 – виброударный процесс, выделенный на резонансной частоте вибропреобразователя; 3 – строб-импульс; 4 – виброударный импульс от проверяемого сопряжения, выделенный в строб-импульсе; φ – фаза положения строб-импульса относительно опорной точки; φ – фаза относительно начала строб-импульса; $A_{\max}$ – максимальная амплитуда

Рисунок 2 – Пояснение частотной и временной селекции виброударного импульса от взаимодействия в проверяемой кинематической паре

Целью исследований являлось выявление отклонений виброакустических характеристик новой форсунки CRIN2 Bosch (0445120141) с электромагнитным управлением и форсунки такой же серии со следами изнашивания наиболее ответственных ее составляющих компонентов (запорного клапана, иглы распылителя и др.).

Форсунки устанавливались на стенде CR-Jet 4E (рисунки 3 и 4). Давление при испытаниях поддерживалось постоянным и составляло 158 бар.

Вибрационные характеристики форсунок получены с использованием датчиков, позволяющих фиксировать вибрации в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Оси, перпендикулярные плоскостям, относительно которых устанавливались датчики, обозначены как x, y, z .

Для получения акустических характеристик исследуемых форсунок использовался микрофон.

Измеренные сигналы передавались для обработки в разработанное диагностическое устройство [1, 2, 5]. Устройство позволяет отображать в режиме реального времени измеряемые виброакустические сигналы относительно трехмерной системы координат x, y, z с одновре-

менной обработкой и отображением амплитудно-частотных характеристик сигнала, получением спектра вибрации путем быстрого преобразования Фурье. Также устройство позволяет сохранять измеренные сигналы с целью их последующего изучения и анализа на компьютере.



Рисунок 3 – Общий вид диагностического стенда CR-Jet 4E для испытаний форсунок с электромагнитным управлением



Рисунок 4 – Исследуемые форсунки CRIN2 (слева – новая форсунка, справа – форсунка со следами изнашивания), установленные на стенде для проведения исследований виброакустических характеристик

Данные для изучения вибрации записывались в бинарные файлы с расширением bin. Данные, снятые с микрофона и характеризующие акустические характеристики форсунок в момент испытаний, записывались в wav-файл.

Измерения сигнала новой и изношенной форсунок фиксировались пятикратно. В итоге было получено по пять файлов: бинарных файлов f_011...f_015.bin сигналы акселерометра, и пять звуковых файлов f_016...f_020.wav. Аналогично для изношенной форсунки получены f_021...f_025.wav сигналы микрофона и f_026...f_029.bin – сигналы акселерометра [6].

Для загрузки бинарного файла вибросигнала использовались следующие команды

$$bf = fopen('f_011.bin');$$

где bf – идентификатор открытого бинарного файла;

fopen() – команда для открытия файла.

$$[M, rM] = fread(bf, 'int16', 'ieee-le').$$

где M – массив данных из бинарного файла;

rM – количество строк в файле;

int16 – формат данных для чтения из файла;

ieee-le' – порядок байтов (от младшего к старшему).

Для получения массива с данными о вибросигнале и температуре испытуемой форсунки (рисунок 5) пользовались функцией, позволяющей изменить размер и транспонировать матрицу M:

$$Data = reshape(M, 4, []);$$

где Data – матрица исходных данных, содержащая 4 столбца.

	1	2	3	4
7	-3690	-16321	592	26
8	-2143	-16824	-876	26
9	700	-16597	-1989	26
10	2486	-15363	-2087	26
11	1226	-14805	-1462	26
12	-1038	-16310	-1252	26
13	-1729	-18701	-1281	26
14	-753	-20909	-957	26
15	524	-21194	336	26
16	744	-19457	1902	26
17	-1064	-17325	840	26
18	-3696	-16344	-1429	26
19	-4291	-16421	-2143	26
20	-2272	-15444	-2396	26
21	-327	-15978	-1919	26
22	-2117	-17107	-705	26
23	-3200	-18056	-308	26
24	-1620	-18760	295	26
25	942	-18271	933	26
26	2054	-16923	1393	26

Рисунок 5 – Фрагмент данных о вибрационных испытаниях новой форсунки, полученных из бинарного файла 'f_011.bin'

Для построения сигнала за время измерения вычислялись значения вектора i :

$$i = 0 \dots \left(\frac{rM}{n} - 1 \right), \quad (4)$$

где n – количество столбцов данных в массиве данных бинарного файла М.

После вычислений по формуле (4) получается значение вектора $i = 0 \dots 14339$.

$$N = 2^{\frac{\log\left(\frac{rM}{n}\right)}{\log(2)}}.$$

Проведенные вычисления показали, что значение составляет $N = 8,192 \cdot 10^3$.

Период дискретизации по результатам исследований составил 0,00063 мкс. Таким образом, производилось 1587 отсчетов за секунду испытаний.

Полученный по формуле (3) массив исходных данных состоит из 4 столбцов. Первые три столбца – вибрация исследуемой форсунки относительно осей *x*, *y*, *z*. Четвертый столбец – температура, фиксируемая в момент проведения измерений.

Таким образом, рассмотрены особенности технологического подхода при исследовании виброакустических характеристик топливных форсунок с использованием многоканальной измерительной системы с гибкой структурой, а также специализированного диагностического стенда.

Литература

1. 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 «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2020. – Вып. 54. – С. 185–191.
2. Ролич, О.Ч. Многоканальная интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики дизельных двигателей / О.Ч. Ролич, В.Е. Тарасенко // Агропанорама. – 2019. – № 5. – С. 42–45.
3. Ролич, О.Ч. Интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики систем, узлов и механизмов дизельного двигателя на базе беспроводной mesh-сети / О.Ч. Ролич, В.Е. Тарасенко, И.И. Балаш // Агропанорама. – 2019. – № 6. – С. 38–41.

4. Технология вибрационного диагностирования дизельных двигателей / В.И. Соловьев, В.И. Беляев, В.А. Мачнев [и др.]. – ГОСНИТИ. – М.: 1979 г. – 41 с.
5. Управление надежностью сельскохозяйственной техники методами диагностики и триботехники [Текст] / В. П. Миклуш [и др.] ; Минсельхозпрод РБ, УО "БГАТУ". – Минск : БГАТУ, 2019. – 392 с.
6. Жешко, А.А. Диагностирование многоканальной измерительной системой с гибкой структурой форсунок фирмы BOSCH / А.А. Жешко, В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич [и др.] // Технический сервис машин. – 2021. – Т.59. № 1 (142). – С. 55–64.
7. Тарасенко, В.Е. Методика формирования теоретико-практической базы результатов анализа динамики спектральных, вейвлетных и статистических образов вибросигналов форсунок / В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич, А.А. Жешко // Агропанорама. – 2025. – № 4(170). – С. 28–34.