

УДК 629.11

СПЕКТРАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ЭЛЕМЕНТОВ ДИЗЕЛЯ

О.Ч. Ролич,

доцент каф. проектирования информационно-компьютерных систем БГУИР, канд. техн. наук, доцент

В.Е. Тарасенко,

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

Д.А. Михаевич,

директор ООО «АКСОНИМ»

А.А. Жешко,

*вед. науч. сотр. сектора эксплуатационно-экономической оценки машин
РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», канд. техн. наук, доцент*

В статье раскрыты этапы спектрально-статистического анализа виброакустических сигналов элементов дизеля при испытании в лаборатории технического сервиса топливной аппаратуры и агрегатов гидросистем на стенде CR Jet-4E.

Ключевые слова: двигатель, датчик, сигнал, режим, спектр, дефект.

The article describes the stages of spectral-statistical analysis of vibro-acoustic signals of diesel engine elements during testing in maintenance laboratory for fuel equipment and hydraulic system units on the CR Jet-4E test bench.

Key words: engine, sensor, signal, mode, spectrum, defect.

Введение

Автоматизированная диагностика изнашивающихся транспортных или промышленных ключевых узлов и механизмов, непосредственно влияющих на безопасность и работоспособность в процессе их эксплуатации, представляет собой сложную и актуальную задачу. Широкое применение в ее решении находят методы виброакустической диагностики на основе анализа спектрограмм и скейлограмм сигналов вибродатчиков и микрофонов [1-3; 11].

Существенный вклад в развитие виброакустической диагностики внесли ученые – Горелик А.Л., Биргер И.А., Барков А.В., Баркова Н.А., а также белорусские ученые – Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф., Давыдов И.Г., Кечик Д.А., Асламов Ю.П. и др. [4, 5]. Основной направленностью их исследований является диагностика роторного оборудования, в частности, подшипников качения и зубчатых приводов.

Решение задачи автоматизированной диагностики узлов дизельных двигателей на базе разработанной авторами многоканальной интегрированной системы [6] с учетом распознавания в аналитическом ансамбле образов виброакустических сигналов изображений дефектов, алгоритм которого описан в источниках [7-9], сопровождается следующими основополагающими этапами:

1. Детектирование в принимаемом виброакустическом сигнале спектральной нестационарности, обусловленной вероятным проявлением дефекта.

2. Анализ спектрального образа участка сигнала, содержащего фрагмент с вероятной нестационарностью, по совокупности метрических характеристик, таких как энергетический центр, цепной код, периметр, площадь, коэффициент толщины и иных параметров, по сути описывающих форму спектрального образа гипотетического дефекта [8].

3. Линеаризация процесса с выявленным фрагментом нестационарности, вычисление и анализ серии передаточных функций и импульсных характеристик, начиная от момента проявления нестационарности.

4. Принятие решения о наличии дефекта.

Целью настоящей работы является разработка научно-обоснованных предпосылок для создания надежного автоматизированного комплекса, способного детектировать, распознавать и идентифицировать дефекты элементов двигателя.

Основная часть

Спектральная нестационарность исследуемого процесса обусловлена ее проявлением хотя бы в одном частотном диапазоне. Поэтому при ее детектировании анализируются спектрограммы изменений во времени амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) виброакустического сигнала на всех частотных диапазонах.

Так, на рисунке 1 представлена палитризованная спектрограмма сигнала MEMS-акселерометра как цифрового датчика виброускорения, установленного непосредственно на корпусе дизельной форсунки

CRIN2, работающей на испытательном стенде CR Jet-4E в режиме VE тестирования предварительного впрыска топлива под давлением 158 бар [10].

Исходя из рисунка 1, можно сделать вывод о том, что процесс функционирования элемента дизельной форсунки, соответствующий произвольно выбранному частотному диапазону, например, 1, 2 или 3, является квазипериодическим и стационарным. В частности, это подтверждается как изменением АЧХ, так и спектрограммами для частотных диапазонов 1 – 3 (рис. 1), результат которых изображен на рисунке 2.

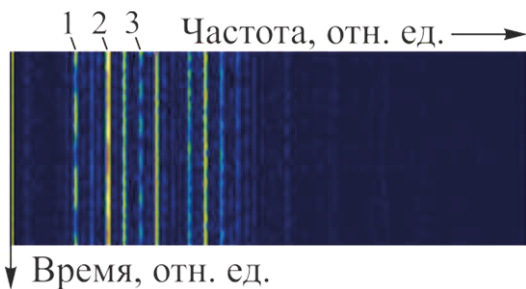


Рисунок 1. Вариант спектрограммы сигнала виброускорения для дизельной форсунки CRIN2, снятого MEMS-акселерометром на испытательном стенде CR Jet-4E

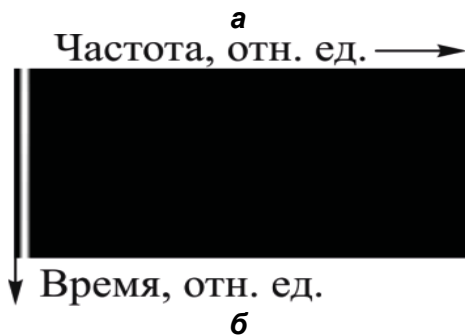


Рисунок 2. Изменение во времени фрагмента АЧХ (а) и спектрограмма (б) для указанного на рисунке 1 частотного диапазона 2 сигнала виброускорения

Следует отметить, что во всех оконных преобразованиях и приведенных спектральных образах используется окно Хэмминга, благодаря чему формируется практически идеальная спектрограмма на рисунке 2б для сигнала на рисунке 2а, представляющего

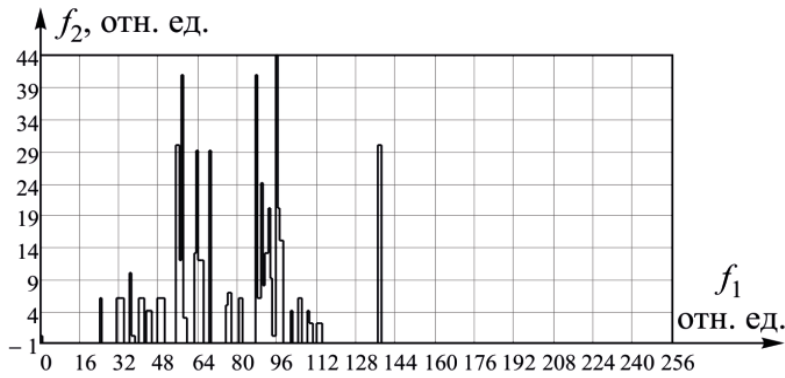
собой изменение во времени амплитуды частотного диапазона 2 исходной спектрограммы рисунка 1 или, иными словами, изменение яркости линии 2 в изображении рисунка 1 по вертикали, т.е. в зависимости от номера строки.

В предположении того, что для спектрально стационарного процесса, к которому относится практически любой процесс, протекающий в дизельной аппаратуре, спектральная форма составляющих виброакустического сигнала в каждом частотном диапазоне спектрограммы остается квазиинвариантной (в частотном диапазоне спектрограммы меняется лишь начальная фаза, а непосредственная зависимость претерпевает циклический сдвиг без существенного изменения формы), в детектировании нестационарности предлагается применять корреляционный анализ множества координат максимумов АЧХ (т.е. доминирующих частот) временных зависимостей для каждого частотного диапазона спектрограммы. Координаты максимумов АЧХ при этом вычисляются с учетом порога: если значение максимума АЧХ выше порогового, то результатом является координата максимума, в противном случае – произвольное отрицательное число, например, минус единица.

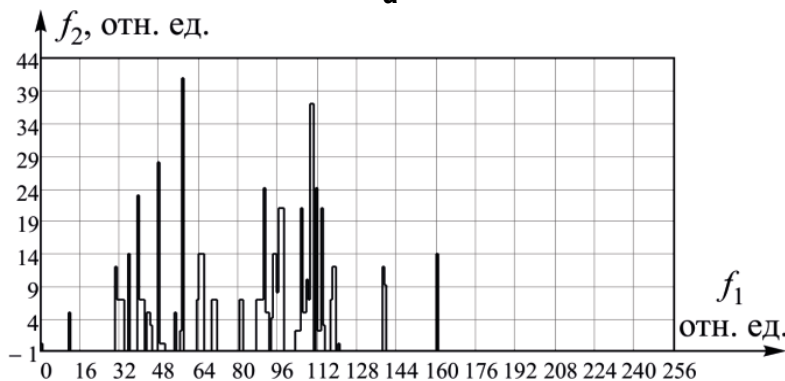
На рисунке 3 приведены графики множеств координат максимумов АЧХ (доминирующих частот) временных зависимостей для каждого частотного диапазона спектрограммы сигнала виброускорения с учетом пороговой обработки, для неизношенной и изношенной форсунок CRIN2, работающих на испытательном стенде CR Jet-4E в режиме VE тестирования предварительного впрыска топлива под давлением 158 бар.

На рисунке 3 f_1 – это частота в исходной спектрограмме, идентичная по смыслу параметру «частоты» на рисунке 1, f_2 – доминирующая частота временной зависимости для определенного частотного диапазона спектрограммы. В данной статье результаты приводятся для количества частотных диапазонов, равного 256. Ширина отдельного диапазона примерно равна 3 Гц. Поэтому ширина изображения спектрограммы на рисунке 1 равна 256 пикселям, а f_1 на рисунке 3 варьируется от 0 до 256.

Из рисунка 3 следует, что ширина спектра вибрационных процессов в изношенной форсунке больше ширины спектра аналогичных процессов в неизношенной форсунке. Таким образом, по мере работы форсунки и ее износа ширина спектра протекающих в ней вибрационных процессов увеличивается. Поэтому при диагностировании дизельной аппаратуры ширину спектра виброакустического



а



б

Рисунок 3. Множества доминирующих частот временных зависимостей для частотных диапазонов спектрограммы сигнала виброускопления у неизношенной (а) и изношенной (б) форсунки CRIN2

сигнала следует использовать в качестве одного из контролируемых параметров.

Резкое изменение множества доминирующих частот обуславливает вероятную нестационарность и влечет за собой переход ко второму этапу автоматизированной диагностики – этапу анализа спектрального образа участка сигнала, содержащего фрагмент вероятной нестационарности. В этом случае спектрограмма, как матрица, интерпретируется в виде полутонового изображения, к которому применяются стандартные методы цифровой обработки изображений [7-9]. Область вероятной нестационарности изображения спектрограммы сегментируется с последующим вычислением множества метрических параметров для каждого сегмента. Значительная часть метрических параметров является интегральными оценками вероятностных характеристик распределения яркости в выделенных сегментах полутонового изображения, вплоть до четвертого порядка. В результате формируются векторы признаков, описывающие отдельные сегменты области вероятной нестационарности, которые корреляционным методом сравниваются со всеми аналогичными векторами, хранящимися в базе данных дефектов. При коэффициенте корреляции выше 0,93 вероятная нестационарность приобретает достоверность, а составляющие ее изображение сегменты переходят в разряд спектральных образов гипотетических дефектов.

Особый интерес представляет мерцательная нестационарность, сопровождающаяся повторяющимися кратковременными проявлениями дефектов в момент их зарождения. Множество метрических параметров зарождающихся дефектов во время их развития способно претерпевать изменения врезрез с базой данных, что может привести к неудовлетворительным значениям коэффициента корреляции и принятию ошибочных или несвоевременных решений в идентификации дефектов. В таких случаях с целью моделирования эволюции спектральных образов дефектов предлагается использовать методы прогнозирования, в частности, линейное предсказание на основе машинного обучения. Линейное предсказание позволит своевременно и с высокой достоверностью идентифицировать дефект, переведя его из ранга гипотетического в идентифицированный. При этом временной фрагмент сигнала с нестационарностью линейризуется, и на каждом шаге, совместно с метрическими параметрами, вычисляются передаточная функция и импульсная характеристика процесса. Также уточняются их усредненные (или взвешенные) зависимости и оцениваются гистограммы распределения периода и длительности появления нестационарности, ее скважности.

При линейризации мгновенная временная передаточная функция на протяжении выявленной нестационарности рассчитывается как отношение спектра последующей K -й сигнальной выборки к спектру предыдущей $(K - 1)$ -й выборки [7]

$$H_K(n) = \frac{\Phi(f_K)}{\Phi(f_{K-1})}, \quad (1)$$

где H – длина сигнальной выборки);

n – номер гармоники ($n = 0, 1, \dots, N/2$);

f_K и f_{K-1} – соответственно, следующая и предыдущая сигнальные выборки;

Φ – оператор быстрого преобразования Фурье.

Вид временной передаточной функции в течение действия нестационарности меняется, и ее образ удобно отобразить в виде спектрограммы. Множество вычисленных при этом импульсных характеристик усредняется с учетом весовой кривой.

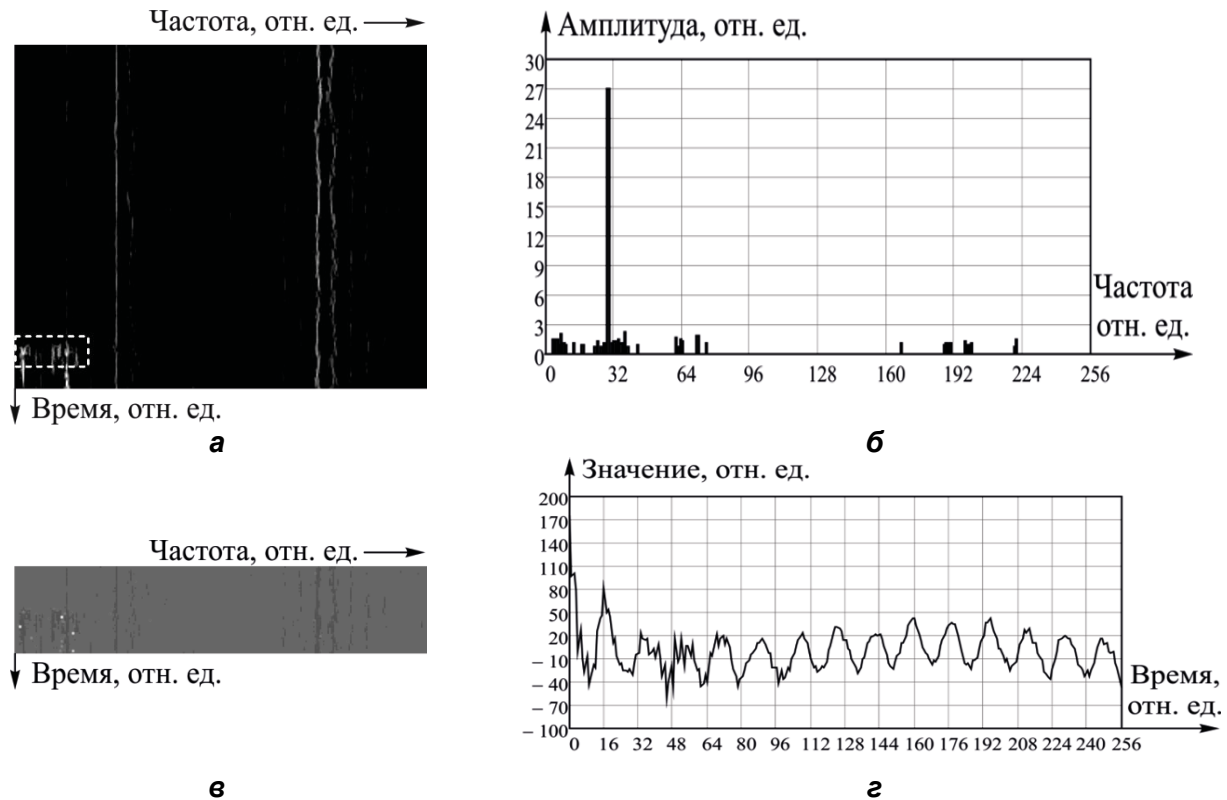


Рисунок 4. Результаты обработки фрагмента вибросигнала с нестационарностью:
 а – исходная спектрограмма с выделенной нестационарностью;
 б – АЧХ одной из передаточных функций в течение проявления нестационарности;
 в – спектрограмма нестационарности;
 г – импульсная характеристика, усредненная по времени действия нестационарности

Так, на рисунке 4а изображена спектрограмма с нестационарностью вибрационного процесса в стенде CR Jet-4E с установленным на испытываемой форсунке CRIN2 вибродатчиком – MEMS-акселерометром. Нестационарность обусловлена изменением режима работы стенда (переходным режимом). На рисунке 4б представлена АЧХ одной из множества вычисленных по формуле (1) временных передаточных функций; на рисунке 4в – спектрограмма нестационарности; на рисунке 4г – импульсная характеристика, усредненная (т.е. взвешенная с учетом весовой кривой) по времени действия нестационарности.

На спектрограмме нестационарности рисунка 4в, представляющей обработанный по формуле (1) фрагмент исходной спектрограммы рисунка 4а, видны небольшие светлые области округлой формы, определяющие моменты возможного детектирования нестационарности, как по отдельным частотам (примерно 3, 30 и 37 гармоники), так и в целом. В частности, в АЧХ на рисунке 4б одной из временных передаточных функций, связанных с нестационарностью, отчетливо выделяется 30-я гармоника, которая также просматривается и в спектрограмме нестационарности на рисунке 4в и в результирующей усредненной импульсной характеристике на рисунке 4г.

Заключение

Исходя из проведенных исследований и представленных в данной статье результатов, в качестве основного вывода следует отметить особую важность первых двух этапов предлагаемого обобщенного алгоритма, а именно: надежного автоматизированного детектирования нестационарности с последующим ее анализом. В связи с этим, дополнительно предлагается использовать комбинированную двунаправленную временную передаточную функцию с частотно-полосовой интеграцией квазилинейных участков спектрограммы, а для оценки остаточного ресурса – степень нелинейности частотных полос в спектрограмме сигнала квазистационарного процесса, наряду с шириной спектра.

Ожидается, что предлагаемый обобщенный алгоритм автоматизированной диагностики узлов дизеля на базе многоканальной интегрированной системы [6] с возможностью детектирования нестационарности, распознавания в спектрограмме виброакустических сигналов образов дефектов и моделирования их эволюции с помощью линейного предсказания на базе машинного обучения, повысит точность идентификации дефекта с момента его зарождения в масштабе реального времени и позволит существенно продлить эксплуатационный ресурс дизельных двигателей.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ
ИСТОЧНИКОВ**

1. Управление надежностью сельскохозяйственной техники методами диагностики и триботехники [Текст] / В.П. Миклуш [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2019. – 392 с.

2. 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.

3. Акутин, М.В. Метод контроля состояния подшипников качения на основе сравнения вейвлет скейлограмм: дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / М.В. Акутин; Казанский гос. энергетический ун-т. – Казань, 2009. – 132 с.

4. Зубко, А.И. Комплексная методика виброакустической диагностики технического состояния подшипниковых опор газотурбинных двигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / А.И. Зубко; ГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». – Москва, 2020. – 21 с.

5. Бранцевич, П.Ю. Применение примеров решений задач вибродиагностики при изучении алгоритмов цифровой обработки сигналов / П.Ю. Бранцевич, В.Э. Базаревский // Исследования наукограда. – 2013. – № 1(3). – С. 49-55.

6. Ролич, О.Ч. Многоканальная интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики

дизельных двигателей / О.Ч. Ролич, В.Е. Тарасенко // Агропанорама. – 2019. – № 5. – С. 42-45.

7. Ролич, О.Ч. Алгоритмы обработки сигналов в интегрированной системе виброакустической и тепловой диагностики дизельной аппаратуры / О.Ч. Ролич, В.Е. Тарасенко, Д.А. Михаевич // Агропанорама. – 2020. – № 6 – С. 38-41.

8. Способ идентификации дефектов двигателя внутреннего сгорания транспортной или тяговой машины: пат. 23682 Респ. Беларусь, МПК6 G01/ М 15 /00, G06К 9/62 / В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич; заявитель Белор. гос. аграрн. техн. ун-т. – № а 20200037; заявл. 03.02.2020; опубл. 30.04.2022.

9. Тарасенко, В.Е. Способ идентификации дефектов двигателя внутреннего сгорания транспортной или тяговой машины: пат. 23704 Респ. Беларусь, МПК6 G01/М 15/00 / В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич; заявитель Белор. гос. аграрн. техн. ун-т. – а 20200084; заявл. 12.03.2020; опубл. 30.04.2022.

10. 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.

11. Омесь, Д.В. Вейвлет-преобразования в виброакустической диагностике механических систем / Д.В. Омесь // Содружество наук: материалы X Междунар. науч.-практич. конф. молодых исследователей, Барановичи, 22 – 23 мая 2014 г.: в 2 кн. – Барановичи: Барановичский государственный университет, 2014. – Кн. 2. – С. 25-28.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 10.08.2022

Навесной оборотный плуг ПНО-3-40/55



Плуг навесной оборотный ПНО-3-40/50 предназначен для гладкой вспашки старопашотных не засоренных камнями почв с удельным сопротивлением до 0,09 МПа. Плуг агрегируется с тракторами класса 2,0 («Беларус 1221»).

Преимущества разработки:

- регулируемая ширина захвата;
- цена на 30-40% ниже зарубежных аналогов.

гов.

Производство плугов освоено на ДП «Минойтовский ремонтный завод».

В 2010 году на сельскохозяйственной выставке в г. Москве плуг удостоен золотой медали.

Основные технические данные

Тип.....	навесной
Тип корпуса.....	полувинтовой
Производительность за 1 ч сменного времени, га.....	0,65...1,14
Конструкционная ширина захвата корпуса, мм.....	400/450/500/550
Рабочая скорость движения на основных операциях, км/ч.....	7...9
Масса плуга конструкционная, кг.....	не более 1150
Конструкционная ширина захвата плуга, м.....	1,20/1,35/1,50/1,65