

УДК 621.43-6:629.3.066.36

В.Е. ТАРАСЕНКО, канд. техн. наук, доц.

заведующий кафедрой технологий и организации технического сервиса

E-mail: trs9@yandex.ru

Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

*Поступила в редакцию 18.06.2025.*

## НАПОЛНЕНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ СПЕКТРОГРАММ И ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ВИБРОСИГНАЛОВ ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК CRIN2

*Изложены результаты научно-исследовательской работы по испытанию топливных форсунок CRIN2 с электромагнитным управлением различной наработкой с использованием специализированного диагностического стенда и многоканальной измерительной системы с гибкой структурой. Выполнено разложение исходного сигнала и регистрация амплитуд колебаний, определены характерные частоты колебаний форсунки, на ответственных деталях которой выявлены следы изнашивания. В совокупности массив данных спектрограмм и вейвлет-преобразований вибросигналов форсунок поколения CRIN2, полученных с использованием математического пакета MATLAB, позволил сформировать и наполнить базу данных. Настоящую базу целесообразно использовать для глубинного анализа спектрограмм и вейвлет-преобразований посредством нейронных сетей с реализацией машинного обучения дескриптора.*

**Ключевые слова:** форсунка, стенд, режим, износ, система, датчик, сигнал, спектр

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-1-74-49-55>

**Введение.** При вибрационном диагностировании топливных 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 форсунки, 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 эффективно использовать характеристики виброакустического диапазона [2, 3] в связи с небольшими искажениями спектра и приемлемым отношением сигнал/помеха. Поскольку интенсивность

удара определяется его кинетической энергией, 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. Этому 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. С увеличением зазоров в кинематических парах уменьшается длительность соударения, что ведет к перераспределению энергии в спектре воздействия и увеличению интенсивности высокочастотных составляющих, что повышает чувствительность метода [1, 4].

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, 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 публикации Е.А. Никитина, Л.В. Станиславского, Э.А. Улановского и других [7].

Особое значение имеет анализ данных вибрации объекта диагностирования. Прибегают к разложению замеров вибрации на уровни для статистического анализа вибрационных процессов. Такое разложение показывает, как часто встречаются те или иные уровни вибрации в исследуемой системе или процессе. Строится график, показывающий распределение значений вибрации, где по одной оси откладываются диапазоны значений вибрации, а по другой — количество измерений, соответствующих каждому диапазону. Анализ может выполняться, например, для определения технического состояния машин и оборудования. При этом границы категорий технического состояния определяются методом статистической классификации (под категориями технического состояния понимаются необходимость и срочность проведения ремонтных операций). Пример использования гистограммы для определения границ категорий технического состояния по общему уровню виброускорения ( $m/c^2$ ) содержит работа [8].

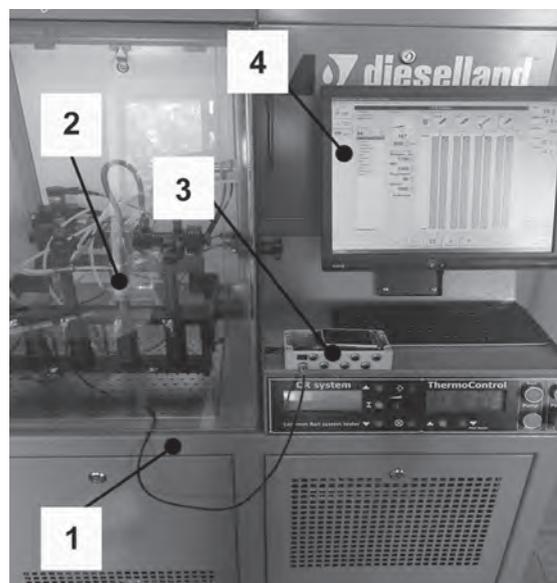
Известны подходы [9], когда осуществляют разложение замеров вибрации на уровни для статистического анализа стабильности вибрационных процессов. При этом оценивается стабильность процесса, а полученные значения среднего уровня, среднего размаха и контрольных границ могут быть использованы для дальнейшего мониторинга.

В настоящей статье представлены результаты разделения общего вектора вибрации форсунки на его компоненты, соответствующие проекциям вибросигнала на оси пространственной декартовой системы координат  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ .

Топливная форсунка CRIN2, на ответственных деталях которой выявлены следы изнашивания, являлась ранее предметом нашего исследования с целью заблаговременного и достоверного определения технического состояния и фиксации зарождающихся дефектов как на поверхности ответственных деталей компонентов топливной аппаратуры, так и внутренних дефектов в структуре металла [10]. Целью настоящей работы является формирование и наполнение базы данных спектрограмм и вейвлет-преобразований вибросигналов топливных форсунок CRIN2 с электромагнитным управлением как основы для глубокого анализа посредством нейронных сетей.

**Основная часть.** При работе по гранту Президента Республики Беларусь в сфере науки в лаборатории технического сервиса топливной аппаратуры и агрегатов гидросистем БГАТУ выполнен комплекс экспериментальных работ по измерению вибрации топливных форсунок на всех режимах нагружения [10, 11]. Использовались многоканальная измерительная система с гибкой структурой [4, 12, 13], диагностические стенды CR-JET 4E (Dieselland, Эстония) (рисунок 1) и «Поток SMART CRI-2F» (ООО «Автоприбор», Беларусь). Объектами исследования выступали топливные форсунки CRIN2 автотракторных дизельных двигателей с электромагнитным управлением (Bosch, Германия; типовой номер 0445120141) различной наработки со следами изнашивания наиболее ответственных деталей, а также новая форсунка. 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 250, 1000 и 1600 бар. При этом вибродатчики MPU9150 и MPU9250 крепили жестко на корпусе форсунок изначально клейкой лентой и дополнительно специальным стяжным хомутом. На рисунке 2 указана плоскость корпуса форсунки, к которой крепился вибродатчик при испытаниях.



**Рисунок 1 — Тестирование топливной форсунки CRIN2 на специализированном диагностическом стенде CR-JET 4E:**  
1 — диагностический стенд CR-JET 4E; 2 — топливная форсунка Bosch (0445120141) с электромагнитным управлением;  
3 — многоканальная измерительная система с гибкой структурой;  
4 — монитор с изображением результатов нагружения форсунки в соответствии с программным обеспечением диагностического стенда

**Figure 1 — Testing of the CRIN2 fuel injector at the CR-JET 4E specialized diagnostic bench:**  
1 — CR-JET 4E diagnostic bench;  
2 — Bosch (0445120141) electromagnetically controlled fuel injector;  
3 — multichannel measuring system with flexible structure;  
4 — monitor showing the results of injector loading in accordance with the diagnostic bench software



Рисунок 2 — Топливная форсунка CRIN2 и место крепления вибродатчика при испытаниях  
Figure 2 — CRIN2 fuel injector and the attachment point of the vibration sensor during testing

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  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , 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 MPU9150 / MPU9250 с предельной частотой обновления данных 1000 отсчетов/с. Датчик вибрации можно подсоединять «на ходу» при работающем диагностическом приборе, а сохраняемый на USB-флеш-диске файл данных имеет стандартный общеизвестный WAV-формат, легко обрабатываемый любым современным программно-математическим пакетом. Диагностический прибор сохраняет сигналы для их последующей вы-

лет-обработки. Фиксировали также температуру форсунок (рисунок 3), 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 конкретному этапу тестирования представлена на рисунке 3.

Во избежание разности подачи тестовой жидкости при нагружении одновременно тестируемую подвергалась одна форсунка. На всех представленных рисунках активной является секция под номером три, фактическое значение расхода тестовой жидкости указывается непосредственно под столбцом (к примеру, на рисунке 3 *a* значение расхода составляет 9,43 см<sup>3</sup>/1000 циклов, а на рисунке 3 *b* — 33,4 см<sup>3</sup>/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 см<sup>3</sup>/1000 циклов, на режиме TL — от 22,9 до 36,1 см<sup>3</sup>/1000 циклов и т. д. [10].

При тестировании форсунки со следами изнашивания цилиндрической поверхности штока управляющего клапана (мультипликатора) и посадочного места шарика запорного клапана на режиме VL (см. рисунок 3 *e*) значение подачи тестовой жидкости составляет 214 см<sup>3</sup>/1000 циклов и не попадает в установленные допустимые пределы (220,2–241,2 см<sup>3</sup>/1000 циклов). А значение расхода тестовой жидкости через магистраль обратного



Рисунок 3 — Рабочее окно программы стенда на режимах тестирования LL (a), LT (b), TL (c), VE (d), VL (e)  
Figure 3 — Operating window of the bench program in LL (a), LT (b), TL (c), VE (d), VL (e) test modes

слива при таких же условиях нагружения составляет  $32,9 \text{ см}^3/1000$  циклов, что полностью соответствует допустимым значениям ( $10,0-80,0 \text{ см}^3/1000$  циклов).

Следует отметить, что при эксплуатации дизельного двигателя, на котором установлены форсунки подобного технического состояния, какие-либо весомые отклонения в работе наблюдаться не будут.

На основании проведенных исследований сформирован массив данных, представленный в виде лабораторного журнала. Фрагмент таблицы данных при тестировании предварительного впрыска топлива (режим VE) представлен в таблице, где размещены результаты измерений, которые приведены в виде разделения общего вектора вибрации на его компоненты, соответствующие проекциям вибросигнала на оси пространственной декартовой системы координат  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Следует отметить, что при разработке многоканальной измерительной системы с гибкой структурой был проработан способ контроля целостности данных, снимаемых в процессе проведения исследований для их безопасной записи, хранения и последующего чтения с внешнего накопителя. Для этих целей параллельно с записью числовых данных параметров вибрации велась запись значений периодической функции, заданной с определенной частотой и амплитудой. В процессе чтения большого массива накопленных данных с внешнего накопителя целостность воспроизводимой опорной гармоника является подтверждением того,

что фрагменты данных в процессе записи или чтения не были утеряны.

Измерения проводились многократно, получено множество бинарных файлов сигналов акселерометров как для топливных форсунок, на ответственных деталях которых выявлены следы изнашивания, так и для форсунок без следов изнашивания. Обработка сигналов, спектральный анализ (рисунки 4 и 5) и вейвлет-преобразования проводились с использованием пакета программ MATLAB.

По видам спектрограмм различимы режимы диагностирования: VL, TL, LL. Наиболее явные изменения спектров в сравнении исправной и изношенной форсунок наблюдаются на режимах VL (самая весомая разница) и TL (см. рисунки 4 и 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 [10]. 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 проведены вейвлет-пре-

Таблица — Фрагмент таблицы данных при тестировании предварительного впрыска топлива, режим VE,  $(\text{м/с}^2) \cdot 10^{-6}$   
Table — Fragment of the data table for testing pre-injection of fuel, VE mode,  $(\text{m/s}^2) \cdot 10^{-6}$

Проекция сигнала на оси декартовой системы координат			Гармоника
$X$	$Y$	$Z$	
0,468719482421875	-0,00747680664062500	0,08676147460937500	-0,121246337890625
0,468719482421875	-0,00747680664062500	0,08676147460937500	-0,121612548828125
0,483856201171875	-0,13232421875000000	0,12579345703125000	-0,121612548828125
0,475708007812500	-0,21844482421875000	0,07894897460937500	-0,121948242187500
0,475708007812500	-0,21844482421875000	0,07894897460937500	-0,122283935546875
0,452392578125000	-0,17971801757812500	-0,00698852539062500	-0,122283935546875
0,452392578125000	-0,17971801757812500	-0,00701904296875000	-0,122589111328125
0,460662841796875	-0,06253051757812500	-0,00701904296875000	-0,122589111328125
0,445343017578125	0,00790405273437500	0,02423095703125000	-0,122894287109375
0,445343017578125	0,00790405273437500	0,02423095703125000	-0,123168945312500
0,452911376953125	-0,05447387695312500	0,05551147460937500	-0,123168945312500
0,460388183593750	-0,14038085937500000	0,06329345703125000	-0,123413085937500
0,460388183593750	-0,14038085937500000	0,06332397460937500	-0,123657226562500
0,499389648437500	-0,15615844726562500	0,02426147460937500	-0,123657226562500
0,531066894531250	-0,04675292968750000	0,03207397460937500	-0,123870849609375
0,531066894531250	-0,04675292968750000	0,03207397460937500	-0,123870849609375
0,530975341796875	-0,07019042968750000	0,03207397460937500	-0,124053955078125
0,499359130859375	-0,16403198242187500	0,00863647460937500	-0,124237060546875
0,499359130859375	-0,16403198242187500	0,00860595703125000	-0,124237060546875

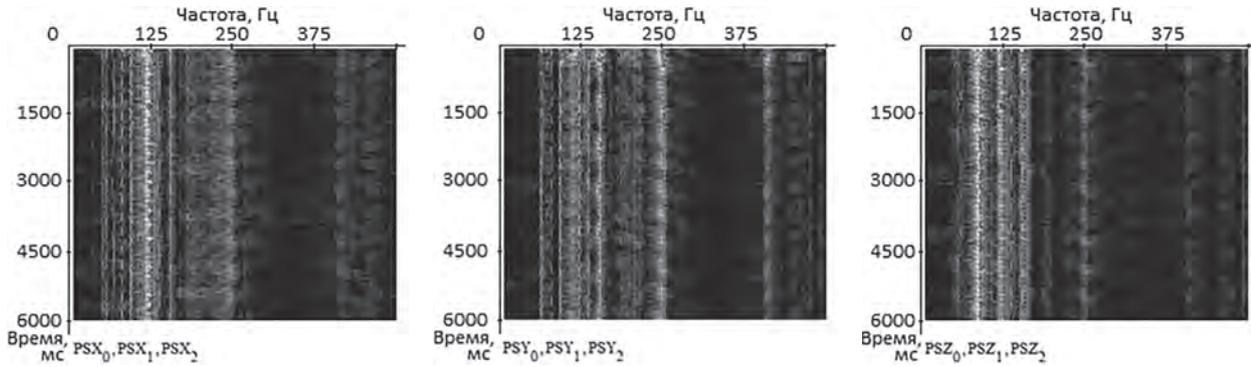


Рисунок 4 — Спектрограммы форсунки с износом запорного конуса клапана и конуса распылителя на режиме VL  
 Figure 4 — Spectrograms of the injector with wear of the shut-off cone of the valve and the atomizer cone in the VL mode

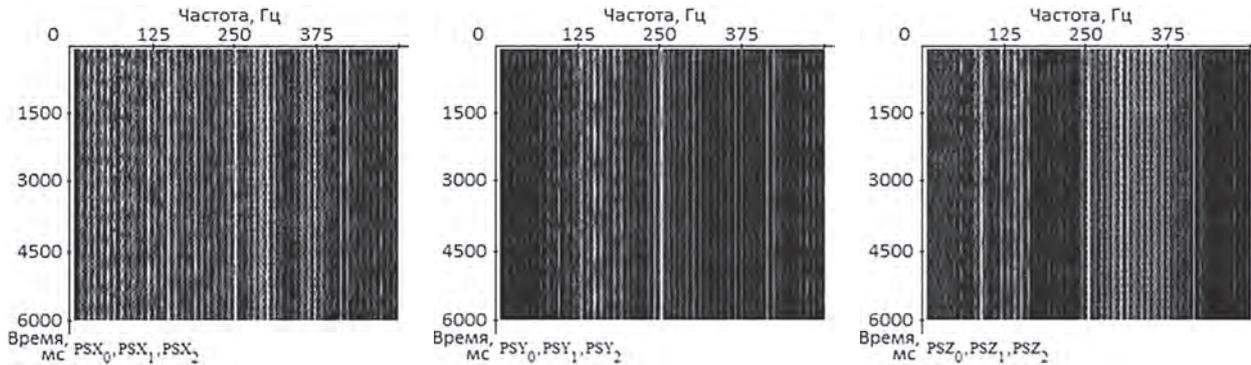


Рисунок 5 — Спектрограммы форсунки с износом запорного конуса клапана и конуса распылителя на режиме TL  
 Figure 5 — Spectrograms of the injector with wear of the shut-off cone of the valve and the atomizer cone in the TL mode

образования. Выполнена математическая обработка сигналов вибрации новой форсунки и форсунки, на ответственных деталях которой отмечены следы изнашивания.

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. Для новой форсунки пики по частотам распределены более равномерно.

Дальнейшим шагом программного диагностирования топливных форсунок выступает выявление в вибросигнале выраженных гармоник с контролем их поведения. Новизна подхода при контроле закреплена в патенте на изобретение [16]. Суть данного решения сводится к обработке спектрограмм (скейлограмм) как набора цифровых данных 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, именуемой аналитическим ансамблем.

Аналитический ансамбль сигнала представляет совокупность образов его преобразований, в качестве которых могут выступать спектрограмма, гистограмма, рангограмма, скейлограмма, корре-

лограмма. Для априори периодического или квазипериодического процесса, к коим, в частности, относятся физические процессы в 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 топливной 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.

Объем данных, полученных в результате выполненных измерений, целесообразно использовать для глубинного анализа спектрограмм и вейвлет-преобразований посредством нейронных сетей. Данная задача может быть реализована за счет разработки нейронного классификатора и дальнейшего составления репрезентативной обучающей выборки. Параллельно должна быть

решена задача обработки зашумленных сигналов и выявления флуктуаций. После решения данных задач можно реализовать машинное обучение дескриптора нейронной сети, качество которого на первых этапах можно проверить путем сопоставления сигналов неисправностей, которые не участвовали в обучении [17]. При этом результаты машинного обучения должны характеризоваться высокой достоверностью (не менее 95 %) и уверенностью классификации.

**Заключение.** В ходе выполнения комплекса экспериментальных работ по измерению вибрации топливных форсунок CRIN2 (0445120141) с электромагнитным управлением на всех режимах нагружения разработан программный многоканальный драйвер цифровых датчиков вибрации, входящих в состав многоканальной измерительной системы с гибкой структурой. На основании проведенных исследований с использованием специализированных диагностических стендов CR-JET 4E и «Поток SMART CRI-2F» 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. В совокупности массив данных спектрограмм и вейвлет-преобразований вибросигналов топливных форсунок поколения CRIN2, полученных с использованием математического пакета MATLAB, формирует базу данных.

### Список литературы

1. Технология вибрационного диагностирования дизельных двигателей / В.И. Соловьев, В.И. Беляев, В.А. Мачнев [и др.]. — М.: ГОСНИТИ, 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: межвед. тематич. сб. / РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». — Минск, 2020. — Вып. 54. — С. 190–196.
3. 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. — DOI: <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-1-55-64>.
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 окт. 2024 г.: в 2 ч. / БГАТУ; редкол.: Н.Н. Романюк [и др.]. — Минск, 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. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова, А.Г. Соколова, Е.И. Хомяков; отв. ред. М.Д. Генкин. — М.: Наука, 1984. — 119 с.
7. Диагностирование дизелей / Е.А. Никитин, Л.В. Станиславский, Э.А. Улановский [и др.]. — М.: Машиностроение, 1987. — 224 с.
8. Vibration metrics for informational support in assessing the technical condition of ball mills / V.F. Borisenko, V.A. Sidorov, A.E. Sushko, V.N. Rybakov // Mining Science and Technology (Russia). — 2024. — Vol. 9, no. 4. — P. 420–432. — DOI: <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-175>.
9. Клячкин, В.Н. Статистический контроль стабильности вибраций гидроагрегата с использованием метода главных компонент / В.Н. Клячкин, И.Н. Карпунина // Надежность и качество сложных систем. — 2021. — № 1(33). — С. 41–48. — DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2021-1-4>.
10. Тарасенко, В.Е. Методы диагностирования зарождающихся эксплуатационных дефектов деталей автотракторных двигателей / В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич, А.А. Жешко // Агротранспорт. — 2025. — № 2(168). — С. 25–31.
11. Тарасенко, В.Е. Эффективные методы и средства диагностирования автотракторных двигателей / В.Е. Тарасенко, А.А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства: тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». — Минск, 2025. — Вып. 58. — С. 268–273.
12. 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 // Агротранспорт. — 2025. — № 4(170). — С. 28–34. — DOI: <https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-170-4-28-34>.
13. Ролич, О.Ч. Многоканальная интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики дизельных двигателей / О.Ч. Ролич, В.Е. Тарасенко // Агротранспорт. — 2019. — № 5(135). — С. 42–45.
14. Управление надежностью сельскохозяйственной техники методами диагностики и триботехники / В.П. Миклуш, А.В. Дунаев, В.Е. Тарасенко [и др.]. — Минск: БГАТУ, 2019. — 392 с.
15. 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». — Минск, 2025. — Т. 1, вып. 58. — С. 305–312.
16. Тарасенко, В.Е. Анализ вибрационных характеристик форсунок CRIN2 автотракторных дизелей / В.Е. Тарасенко // Аграрное образование и наука для агропромышленного комплекса: материалы респ. науч.-практ. конф. Белорусская агропромышленная неделя БЕЛПРО-2024, Индустриальный парк «Великий камень», 5 июня 2024 г. / УО «БГСХА»; редкол.: В.А. Самсонович (гл. ред.) [и др.]. — Горки: БГСХА, 2024. — С. 254–257.
17. Патент BY 23682, МПК G01M 15/00 (2006.01), 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 УО «БГАТУ». — 7 с. — URL: <https://clck.ru/3REMGI>.
18. Золотухина, М.А. Интеллектуальная система регулирования технической диагностики роторного оборудования с помощью машинного обучения / М.А. Золотухина, С.А. Золотухин // International Journal of Professional Science. — 2021. — № 6. — P. 68–73.

TARASENKO Viktor E., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Department of Technologies and Organization of Technical Service

E-mail: trs9@yandex.ru

Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus

June 18, 2025.

## FILLING THE DATABASE OF SPECTROGRAMS AND WAVELET TRANSFORMS OF VIBRATION SIGNALS OF FUEL INJECTORS CRIN2

The article presents the results of the research work on testing CRIN2 electromagnetically controlled fuel injectors of various operating times using a specialized diagnostic bench and a multichannel measuring system with a flexible structure. The original signal was decomposed and the oscillation amplitudes were recorded, the characteristic oscillation frequencies of the injector were determined, on the critical parts of which traces of wear were detected. In total, the array of spectrograms and wavelet transforms of vibration signals of CRIN2 generation injectors obtained using the MATLAB mathematical package made it possible to form and fill the database. It is advisable to use this database for in-depth analysis of spectrograms and wavelet transforms using neural networks with the implementation of machine learning of the descriptor.

**Keywords:** injector, bench, mode, wear, system, sensor, signal, spectrum

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-1-74-49-55>

### References

- Solovev V.I., et al. *Tekhnologiya vibratsionnogo diagnostirovaniya dizelnykh dvigateley* [Technology of vibration diagnostics of diesel engines]. Moscow, GOSNITI Publ., 1979. 41 p. (in Russ.).
- Tarasenko V.E., Zheshko A.A. Issledovanie vibratsii forsunok s pomoshchyu mnogokanalnoy sistemy s gibkoy strukturoy [Study of injector vibration using a multi-channel system with a flexible structure]. *Mechanization and electrification of agriculture*, 2020, iss. 54, pp. 190–196 (in Russ.).
- Zheshko A.A., Tarasenko V.E., Rolich O.Ch., Dunaev A.V. Diagnostirovanie mnogokanalnoy izmeritelnoy sistemy s gibkoy strukturoy forsunok firmy BOSCH [Diagnostics with a multi-channel measuring system with a flexible structure of BOSCH injectors]. *Machinery technical service*, 2021, vol. 59, no. 1(142), pp. 55–64. DOI: <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-1-55-64> (in Russ.).
- Tarasenko V.E., Karpovich S.K. Osobennosti diagnostirovaniya forsunok s elektromagnitnym upravleniem [Features of diagnostics of injectors with electromagnetic control]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Tekhnicheskoe i kadrovoe obespechenie innovatsionnykh tekhnologiy v selskom khozyaystve"* [Proc. international scientific and practical conference "Technical and personnel support of innovative technologies in agriculture"]. Minsk, 2024, part 2, pp. 28–31 (in Russ.).
- Genkin M.D., Sokolova A.G. *Vibroakusticheskaya diagnostika mashin i mekhanizmov* [Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 288 p. (in Russ.).
- Balitsky F.Ya., Ivanova M.A., Sokolova A.G., Khomyakov E.I. *Vibroakusticheskaya diagnostika zarozhdayushchikh defektov* [Vibroacoustic diagnostics of incipient defects]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 119 p. (in Russ.).
- Nikitin E.A., et al. *Diagnostirovanie dizeley* [Diagnostics of diesel engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 224 p. (in Russ.).
- Borisenko V.F., Sidorov V.A., Sushko A.E., Rybakov V.N. Vibration metrics for informational support in assessing the technical condition of ball mills. *Mining science and technology (Russia)*, 2024, vol. 9, no. 4, pp. 420–432. DOI: <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-175>.
- Klyachkin V.N., Karpunina I.N. Statisticheskii kontrol stabilnosti vibratsiy gidroagregata s ispolzovaniem metoda glavnnykh komponent [Statistical control of hydro-unit vibrations stability using the principal components method]. *Reliability & quality of complex systems*, 2021, no. 1(33), pp. 41–48. DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2021-1-4> (in Russ.).
- Tarasenko V.E., Rolich O.Ch., Zheshko A.A. Metody diagnostirovaniya zarozhdayushchikh defektov detaley avtotraktornykh dvigateley [Methods for diagnosing emerging operational defects in parts of automotive and tractor engines]. *Agropanorama*, 2025, no. 2(168), pp. 25–31 (in Russ.).
- Tarasenko V.E., Zheshko A.A. Effektivnye metody i sredstva diagnostirovaniya avtotraktornykh dvigateley [Effective methods and means of diagnosing tractor engines]. *Mechanization and electrification of agriculture*, 2025, iss. 58, pp. 268–273 (in Russ.).
- Tarasenko V.E., Rolich O. Ch., Zheshko A.A. Metodika formirovaniya teoretiko-prakticheskoy bazy rezultatov analiza dinamiki spektralnykh, veyvletnykh i statisticheskikh obrazov vibrosignalov forsunok [Methodology of forming the theoretical and practical basis of the dynamics analysis results of spectral, wavelet and statistical images of vibration signals of nozzles]. *Agropanorama*, 2025, no. 4(170), pp. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-170-4-28-34> (in Russ.).
- Rolich O.Ch., Tarasenko V.E. Mnogokanalnaya integrirovannaya sistema vibroakusticheskoy i teplovoy diagnostiki dizelnykh dvigateley [Multichannel integrated system of vibroacoustic and thermal diagnostics of diesel engines]. *Agropanorama*, 2019, no. 5(135), pp. 42–45 (in Russ.).
- Miklush V.P., et al. *Upravlenie nadezhnostyu selskokhozyaystvennoy tekhniki metodami diagnostiki i tribotekhniki* [Reliability management of agricultural machinery using diagnostic and tribotechnical methods]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy agrarnyy tekhnicheskii universitet Publ., 2019. 392 p. (in Russ.).
- Tarasenko V.E., Rolich O.Ch., Zheshko A.A. Programmnyy drayver tsifrovyykh datchikov vibratsii, vkhodyashchikh v sostav mnogokanalnogo pribora integrirovannogo vibroakusticheskogo i teplovogo diagnostirovaniya [Software driver for digital vibration sensors included in the multichannel integrated vibroacoustic and thermal diagnostics device]. *Mechanization and electrification of agriculture*, 2025, vol. 1, iss. 58, pp. 305–312 (in Russ.).
- Tarasenko V.E. Analiz vibratsionnykh kharakteristik forsunok CRIN2 avtotraktornykh dizeley [Analysis of vibration characteristics of CRIN2 injectors of automotive and tractor diesel engines]. *Materialy respublikanskoй nauchno-prakticheskoy konferentsii "Agrarnoe obrazovanie i nauka dlya agropromyshlennogo kompleksa"* [Proc. republican scientific and practical conference "Agrarian education and science for the agro-industrial complex"]. Gorki, 2024, pp. 254–257 (in Russ.).
- Tarasenko V.E., Rolich O.Ch. *Sposob identifikatsii defektov dvigatelya vnutrennego sgoraniya transportnoy ili tyagovoy mashiny* [Method for identifying defects in an internal combustion engine of a transport or traction machine]. Patent BY, no. 23682, 2022 (in Russ.).
- Zolotukhina M.A., Zolotukhin S.A. Intellektualnaya sistema regulirovaniya tekhnicheskoy diagnostiki rotornogo oborudovaniya s pomoshchyu mashinnogo obucheniya [Intelligent control system for technical diagnostics of rotary equipment using machine learning]. *International journal of professional science*, 2021, no. 6, pp. 68–73 (in Russ.).