

В. Е. Тарасенко¹, А. А. Жешко²

¹УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь

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

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация. В статье представлены результаты анализа методов диагностирования автотракторных двигателей, описаны современные приемы контроля износа трущихся деталей в режиме реального времени и виброакустические методы, позволяющие в совокупности обеспечить индивидуализацию оценки состояния двигателя в течение срока эксплуатации. Приведены результаты комплекса научно-исследовательских работ по испытанию форсунок CRIN2 автотракторных двигателей различной наработки, а также анализа их вибрационных характеристик. Выполнены разложение исходного сигнала на уровни и регистрация амплитуд колебаний, свойственных определенным уровням разложения, что позволило составить характерные частоты колебания элементов форсунки. Предложено решение, позволяющее дополнить разработанную ранее многоканальную измерительную систему функциональными возможностями по регистрации и оценке процесса индицирования двигателя.

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

V. E. Tarasenko¹, A. A. Zheshko²

¹EI “Belarusian State Agrarian Technical University”
Minsk, Republic of Belarus

²RUE “SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization”
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: azeshko@gmail.com

EFFECTIVE METHODS AND MEANS OF DIAGNOSING AUTOTRACTOR ENGINES

Abstract. The article presents the results of the analysis of diagnostic methods for automotive and tractor engines, describes modern methods for monitoring wear of rubbing parts in real time and vibroacoustic methods that together allow for individualization of the engine condition assessment during its service life. The article presents the results of a set of research works on testing CRIN2 injectors of automotive and tractor engines of various operating hours, as well as an analysis of their vibration characteristics. The original signal is decomposed into levels and the oscillation amplitudes characteristic of certain decomposition levels are recorded, which made it possible to compile characteristic oscillation frequencies of the injector elements. A solution is proposed that allows supplementing the previously developed multichannel measuring system with functional capabilities for recording and assessing the engine indexing process.

Keywords: diagnostics, engine, method, wear, sensor, signal, injector, spectrum, stand.

В мировой практике создания и эксплуатации машин актуальными остаются проблемы обеспечения надежности их работы, безразборного контроля и прогнозирования технического состояния. Увеличение ресурса и повышение надежности машин и механизмов предполагают переход на эксплуатацию технических объектов по фактическому состоянию, а это возможно только при наличии эффективных методов и средств диагностирования [1].

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что внедрение современных средств диагностирования является одним из важнейших факторов повышения экономической эффективности использования машин и механизмов в народном хозяйстве [1–14].

Виброакустические	
Виды методов	Области применения
Спектральный анализ вибрации: – частотный анализ; – спектральный анализ; – анализ ударных импульсов; – кепстральный анализ; – анализ спектра вибрации по огибающей; – фазовое сравнение сигналов вибрации; – амплитудно-временной анализ сигналов вибрации; – корреляционный анализ взаимных спектров вибрации; – определение акустической эмиссии; – статистический анализ вибрационных характеристик; – модуляция вибрационных процессов; – амплитуда вибрации пик-фактора; – величина эксцесса; – резонансная частота узла (детали), механизма, газовых и гидравлических потоков; – сопоставление спектров; – анализ вейвлетных образов сигналов	Исследование динамических характеристик конструкции, технологий производства и технического состояния двигателей в эксплуатации Высокая информативность вибрационных сигналов на изменение структурных, функциональных и динамических состояний деталей машин Высокая универсальность, чувствительность и избирательность вибрационного сигнала к параметрам механических, гидравлических, газо- и аэродинамических, электрических и магнитных систем Большой объем информации в одном измерении вибрации, высокая скорость диагностирования, позволяющая автоматизировать контроль технического состояния Нормирование вибрации для контроля уровня проектирования, качества изготовления и эксплуатации
Энергетические и гидрогазоаэродинамические методы	
Механический КПД Индикаторные показатели (мощность, КПД, расход топлива) Эффективная мощность Неравномерность работы цилиндров Скорость и неравномерность вращения коленчатого вала Компрессионные свойства цилиндров Внутрицикловое изменение (колебание) угловой скорости коленчатого вала Изменение крутящего момента и угловой скорости вала по углу поворота при равномерной работе цилиндров Амплитудно-фазовые параметры (осциллограммы) изменения напряжения, тока, сопротивления в первичной и вторичной цепях (переходных процессов) зажигания, давления в цилиндрах	Диагностика ЦПГ, КШМ, элементов топливной системы (насосов, гидравлического аккумулятора, форсунок, системы сгорания и расхода топлива) Доводка конструкции двигателей до заданных технических характеристик, оценка качества ремонта и эксплуатации отдельного двигателя и в составе транспортного средства

Рисунок 1 – Отдельные группы методов диагностирования автотракторных двигателей (виброакустические, энергетические и гидрогазоаэродинамические) с привнесенным подвидом анализа вейвлетных образов сигналов

Достаточно полная классификация методов диагностирования автотракторных двигателей изложена в работах В. Д. Мигалья [2, 3], где рассмотрены интеллектуальные и инструментальные методы, анализ которых позволяет отметить 12 групп методов диагностирования, позволяющих формировать массив данных с высокой степенью достоверности. Наибольший интерес представляют группы методов контроля износа трущихся деталей и смазки, виброакустические, энергетические и гидрогазоаэродинамические. В группе виброакустических методов выделены такие виды, как частотный и спектральный анализ, корреляционный анализ взаимных спектров вибрации и сопоставление спектров. Исследования последних лет авторов статьи позволили привнести в данную группу вид – анализ вейвлетных образов сигналов (рисунок 1), позволяющий обеспечить высокую достоверность при идентификации дефектов в узлах и агрегатах дизельных двигателей.

В ходе анализа литературных данных [1, 8, 11] установлены шесть специальных методов диагностирования зарождающихся дефектов. Таковыми являются: метод ударных импульсов; метод спектрального анализа амплитудной огибающей вибросигнала на резонансной частоте датчика «резонансный метод»; метод формирования n -мерного вектора кратных гармоник спектра огибающей вибросигнала на резонансной частоте узла механизма; метод формирования n -мерного вектора кратных гармоник спектра огибающей вибросигнала в окрестностях основных частот возбуждения механизма; обнаружение зарождающихся дефектов по величине коэффициента эксцесса; метод выделения когерентной составляющей.

Известна малогабаритная система встроенного контроля «АИДА» [4, 5] для определения степени износа кривошипно-шатунного механизма (КШМ) и цилиндропоршневой группы (ЦПГ) ДВС в режиме реального времени и прогнозирования их остаточного ресурса. Диагностически-

ми признаками в данном случае являются концентрация, размер и материал продуктов износа. Они позволяют определить возможные места и стадии износа, а изменение концентрации показывает интенсивность развития неисправностей. При этом происходит осаждение из масла продуктов износа (Fe, Pb, Sn) в рабочий объем датчика с определением их состава и массы электронным блоком. Данная система имеет высокую чувствительность (около 0,0001 г массы частиц износа в рабочем объеме датчика), большой диапазон регистрации металлов и сплавов и высокую надежность.

Комплексные исследования образцов свежих и отработанных масел позволили разработать интеллектуальные алгоритмы оценки состояния масла (ОСА), которые способны определять его состояние на основе параметров, непосредственно измеряемых в масле (динамическая вязкость, удельная плотность, диэлектрическая проницаемость, проводимость, уровень масла и его температура). При этом используются новые комбинированные пьезоэлектрические датчики (на основе монокристаллического кварца), основным элементом которых является камертон, так называемые камертонные датчики [15–19]. Электродами со всех сторон поверхности вызывают периодическую и упругую деформацию материала корпуса под воздействием электрического переменного напряжения. Эта вибрация создает электрический переменный ток, который течет через электроды. Электрический импеданс, рассматриваемый как соотношение между возбуждающим переменным напряжением и результирующим переменным током, является функцией, зависящей от стимулирующей частоты, свойств упругого материала, гидродинамических свойств поверхности датчика и свойств окружающей среды. Для измерения механического демпфирования и массовой нагрузки камертона, колеблющегося в масле, этот резонатор работает в диапазоне его резонансной частоты. Благодаря выбранной конструкции эта частота у рассматриваемого датчика расположена в нижнем диапазоне (кГц). Несмотря на объемные колебания камертона, амплитуда которого составляет около 100 нм, он устойчив к внешним возмущениям, таким как механические вибрации, удары по креплению датчика или акустический шум, благодаря особой сбалансированной конструкции.

Для анализа изменения резонансной кривой используется электромеханическая модель. Комплексный импеданс изгибных резонаторов (например, датчика камертона) можно смоделировать с помощью эквивалентной электрической схемы. Формулы модели содержат переменные: динамическая вязкость η , удельная плотность ρ , диэлектрическая проницаемость ϵ и электрическая проводимость σ окружающей среды. С помощью алгоритма нелинейной оптимизации эти параметры вычисляются и дают прямую информацию о параметрах физического состояния.

В отличие от общепринятых концепций и алгоритмов оценки состояния масла благодаря последним разработкам стало возможным за счет интеграции всей системы аппаратного и программного обеспечения управления состоянием масла мобильных машин более конкретно и точно адаптировать интервалы технического обслуживания и замены масла к двигателю машины и режиму его эксплуатации.

Существенным преимуществом рассмотренного алгоритма определения состояния масла с использованием пьезоэлектрических датчиков является многомерный анализ его параметров, при котором они нелинейно комбинируются для прогнозирования состояния масла. Таким образом можно определить важные свойства масла, такие как содержание сажи, воды или разбавление дизельного топлива. Однако данные алгоритмы и технические средства не позволяют определять места и стадии активного изнашивания деталей двигателя, так как в масле не ведется учет продуктов износа (Fe, Pb, Sn) с определением их состава и массы электронными средствами. Не осуществляется контроль интенсивности развития неисправностей.

Исследования многих отечественных и зарубежных ученых позволяют утверждать то, что вибрации являются носителями уникальной информации о тончайших нюансах поведения конструкции и действующих в ней рабочих процессов. По скорости реакции на любые изменения состояния вибрациям нет равных среди других сопровождающих физических явлений. Структуры вибраций указывают на свое происхождение, т. е. демаскируют дефект. После устранения дефекта вибрации существенно ослабевают [6].

Вибросигналами оценивают зазоры и некоторые дефекты сопряжений. Но и один механизм эмиссирует широкий спектр ревербирующих сигналов от десятка Гц до сотен кГц и МГц, т. е. образуется широкополосный виброакустический фон, в котором полезный сигнал скрыт. В нем выделить нужный сигнал затруднительно, отношение полезного вибросигнала к фону порой невелико, добротность диагностики порой невысока [7].

При виброконтроле получают разнообразные, порой трудно понимаемые спектры, осциллограммы и другие характеристики сигналов, хотя некоторые из них имеют информативные качественные признаки и количественные характеристики. Поэтому, чтобы из вибрационного фона выделить сигнал от одного механизма при работе в агрегате нескольких, требуются установка самого информативного режима работы объекта контроля, специальная установка вибродатчиков, частотная и временная селекция сигналов в виброаппаратуре [7].

Известно, что все узлы имеют собственную резонансную частоту. На этом основан метод вибродиагностирования, предложенный В. И. Соловьевым, В. А. Аллилуевым, В. И. Беляевым. При резонансном вибродиагностировании осуществляется контроль слабой амплитуды вибросигнала в резонансной частоте пьезоакселерометра. Географическая, фазовая (временная), частотная и резонансная селекции при получении вибросигнала позволяют оценивать форму и амплитуду сигнала.

Анализ литературных источников [1, 6, 8–11, 15–18] позволил установить характерные фазы проявления дефектов для четырехтактного двигателя [14], а также спектральные области проявления дефектов [14].

В рамках гранта Президента Республики Беларусь в сфере науки на 2024 г. в лаборатории технического сервиса топливной аппаратуры и агрегатов гидросистем БГАТУ выполнен комплекс работ по испытанию форсунок CRIN2 автотракторных дизелей различной наработки (в том числе и новой форсунки) и последующему анализу их вибрационных характеристик.

На стенде CR-jet 4E (Dieselland) с использованием разработанной многоканальной измерительной системы с гибкой структурой испытаны форсунки CRIN2 Bosch (типовые номера 0445120141 и 0445120074) при давлении впрыска в них 158, 500 и 1 600 бар [7, 12]. При этом вибродатчики MPU9150 крепили на форсунках (рисунок 2), а для акустики использовали цифровой миниатюрный MEMS-микрофон INMP621.

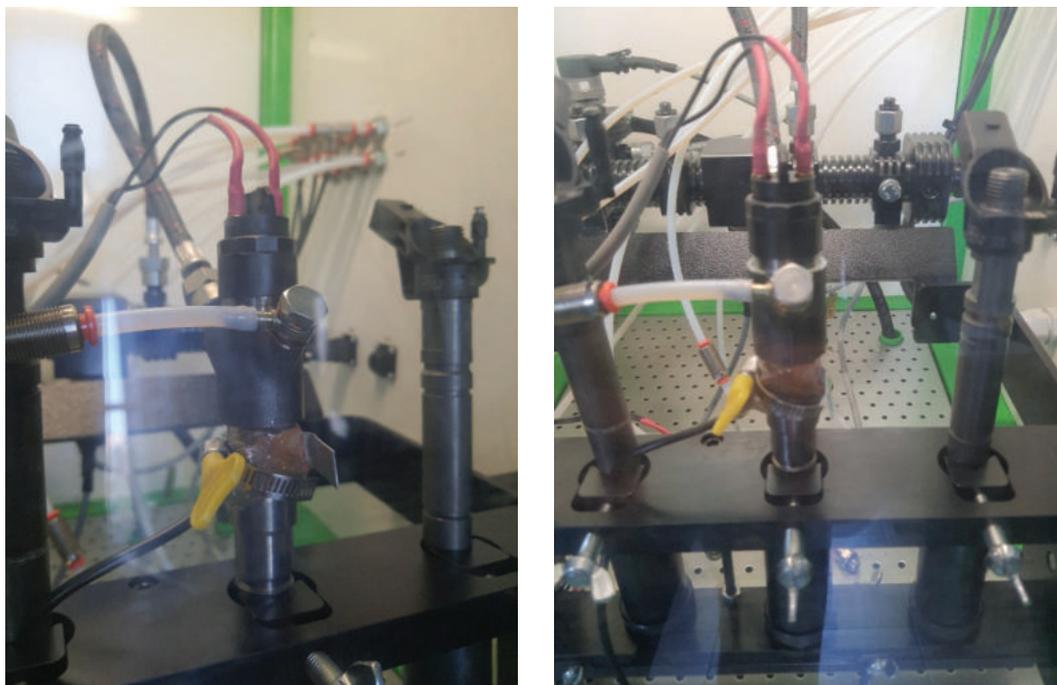


Рисунок 2 – Испытуемая форсунка CRIN2 смонтирована на диагностическом стенде CR-jet 4E (Dieselland), датчик вибрации дополнительно прижат к корпусу форсунки стяжным хомутом

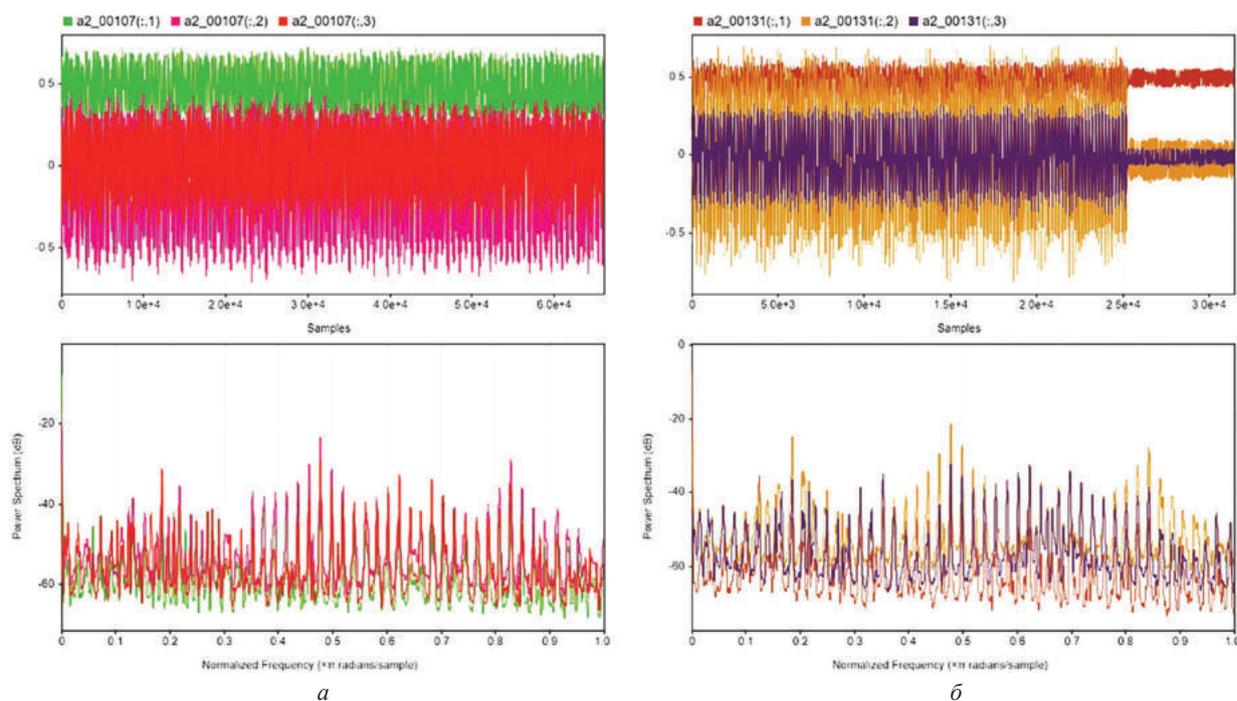


Рисунок 3 – Результаты тестирования форсунки CRIN2 в режиме холостого хода LL: *a* – исправная форсунка (повторное испытание); *б* – форсунка со следами умеренного износа посадочной поверхности клапана

Разработанная измерительная система отображает в режиме реального времени вибросигналы относительно системы координат *xuz*, создает АЧХ быстрым преобразованием Фурье. Также система сохраняет сигналы для их последующей вейвлет-обработки. Изначально они записывались в бинарные файлы с расширением *bin*, а позднее – в *wav*-файлы с фиксацией момента перехода на следующий тест-план. Фиксировали температуру форсунок, а их шум записывали в *wav*-файл [7].

Разложение исходного сигнала на уровни и регистрация амплитуд колебаний, характерных для определенных уровней разложения, позволяют составить характерные частоты колебания элементов форсунки. Изучение виброакустических характеристик рассматриваемых форсунок (как новых, так и с наработкой) и регистрация изменения характерных частот в зависимости от наработки (рисунок 3) позволяют диагностировать техническое состояние каждой рассматриваемой форсунки и прогнозировать ее ресурс. Методами обработки сигнала могут служить как спектральный анализ, так и вейвлет-преобразование.

В настоящее время осуществима регистрация процесса индицирования двигателя в режиме реального времени, связанного с записью быстроизменяющихся давлений в его цилиндрах и внутренних полостях. Это позволяет с наибольшей достоверностью определять среднее индикаторное давление и индикаторную мощность двигателя, оценивать особенности отдельных рабочих процессов, механические потери на трение, показатели политроп сжатия и расширения, жесткость работы двигателя и иные закономерности.

В связи с этим упомянутая выше многоканальная измерительная система дополняется функциональными возможностями по регистрации и оценке процесса индицирования.

Также проводятся работы по оценке достаточно нового метода контроля давлений в цилиндрах двигателя и внутренних полостях с помощью свечей накаливания с датчиками давления в цилиндре. Для экспериментальных работ приняты высокотехнологичные свечи BERU 0103010907, серийно устанавливаемые на автомобили OPEL.

Заключение

Таким образом, при оценке состояния систем и механизмов двигателя наиболее результативным и достоверным является комплексный подход, когда данные, к примеру, виброакустических наблюдений дополняются и сопоставляются с данными методов контроля износа конкретных

трущихся деталей и результатами индицирования. За счет управления состоянием масла мобильных машин в режиме реального времени стало возможным точно адаптировать интервалы замены масла в соответствии с его фактическим состоянием к соответствующему мобильному средству и режиму его эксплуатации.

Методами обработки сигнала могут служить как спектральный анализ, так и вейвлет-преобразование. В дальнейших исследованиях целесообразно сочетание разработанного и известных методов диагностирования автотракторных двигателей.

Список использованных источников

1. Балицкий, Ф. Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф. Я. Балицкий, М. А. Иванова, А. Г. Соколова [и др.]. – М. : Наука, 1984. – 119 с.
2. Мигаль, В. Д. Техническая диагностика автомобильных двигателей : учеб. пособие в 3 т. / В. Д. Мигаль. – Харьков : Майдан, 2014. – Т. 1 : Объекты и методы диагностирования. – 459 с.
3. Мигаль, В. Д. Техническая диагностика автомобильных двигателей : учеб. пособие в 3 т. / В. Д. Мигаль. – Харьков : Майдан, 2014. – Т. 2 : Неисправности, параметры и средства диагностики. – 403 с.
4. Матвеевский, Б. Р. Метод контроля износа узлов трения / Б. Р. Матвеевский, В. Р. Матвеевский // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2011, № 1. – С. 14–16.
5. Патент Российская Федерация МПК (2006.01) G01N 3/56. Устройство для контроля износа пар трения : № 77 438 U1 : заявлено 30.04.2008 : опубл. 20.10.2008 / Б. Р. Матвеевский, В. Р. Матвеевский.
6. Коновалов, А. И. Диагностируем на «Дельфине» : метод. пособие / А. И. Коновалов, О. Н. Лукьяненко. – Луганск, 2006. – 100 с.
7. 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.
8. Лазерная виброакустическая диагностика дефектов многослойных конструкций : учеб. пособие / В. И. Мордасов, Н. А. Сазонникова, С. А. Сорокина, О. В. Шулепова. – Самара : Изд-во Самар., гос. аэрокосм., ун-та, 2008. – 80 с.
9. Герике, П. Б. Анализ виброакустических характеристик двигателей внутреннего сгорания / П. Б. Герике // Горные машины и оборудование. – 2014. – № 2. – С. 15–18.
10. Щеглов, В. А. О возможности диагностики цилиндро-поршневой группы ДВС методом частотно-амплитудного анализа сигнала вибрации с использованием вейвлет-анализа / В. А. Щеглов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2015. – Т. 1, № 3. – С. 1–8.
11. Ширман, А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – М. : Наука. – 1996. – 276 с.
12. Результаты диагностирования форсунки CRIN2 дизеля трактора «Беларус-3522.5» / В. Е. Тарасенко, О. О. Мухля, М. Д. Бобриков, Д. Д. Попека // Проблемы и перспективы развития инженерной науки в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию работы кафедры эксплуатации и ремонта машин инженерного факультета и 90-летию д.т.н., профессора, почетного работника высшего профессионального образования Российской Федерации Зорина Александра Ивановича ; Ижевск, 13–15 февр. 2024 г. – Ижевск : УдГАУ, 2024. – С. 47–53.
13. Тарасенко, В. Е. Анализ вибрационных характеристик форсунок CRIN2 автотракторных дизелей / В. Е. Тарасенко // Аграрное образование и наука для агропромышленного комплекса : материалы республик. науч.-практ. конф. Белорусская агропромышленная неделя БЕЛАГРО-2024 ; редкол.: В. А. Самсонович (гл. ред.) [и др.]. – Горки : БГСХА, 2024. – С. 254–257.
14. Тарасенко, В. Е. Использование методов функционального диагностирования автотракторных двигателей / В. Е. Тарасенко // Современные проблемы и пути развития технического сервиса в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф. ; Минск, 5–6 июня 2024 г. ; редкол.: Л. М. Акулович [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2024. – С. 49–55.
15. Jorge Duarte-Forero. Failure analysis in single-cylinder diesel engine SK-MDF300 through acoustic emissions / Duarte-Forero Jorge, Sergio Andrés Ramón-Ramón, Guillermo Valencia-Ochoa // Respuestas, Journal of Engineering Sciences. – 2020. – 25(2) May-August. – P. 83–90.
16. Elamin, Fathi. Fault Detection and Diagnosis in Heavy Duty Diesel Engines Using Acoustic Emission / Fathi Hassen Elamin // Doctoral thesis, University of Huddersfield. – November 2013. – 265 p.
17. Ribbens, William. Incipient failure detection in bus engine components / William B. Ribbens, Mitra Naaseh // Center for Transit Research and Management Development University of Michigan Transportation Research Institute. – MARCH, 1987. – 71 p.
18. Chaitidis, G. D. Vibration Analysis of a Common Rail Diesel Engine using Biodiesel: A Case Study / G. D. Chaitidis, T. S. Karakatsanis, V. Kanakaris [et al.] // Journal of Engineering Science and Technology Review. – 12 (5). – 2019. – P. 167–175.
19. Dobrinski, H. Micro-sensors for automotive liquid properties monitoring (D5.4) / Heiko Dobrinski, Torsten Eggers, Jörg Stürmann [and others] // SENSOR + TEST Conferences. – 2011, SENSOR Proceedings. – P. 612–617.