

А.В. Логунов, А.Л. Береснев

ВИБРОМОНИТОРИНГ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Работа посвящена проблеме диагностирования автомобильных двигателей внутреннего сгорания. Проблема контроля состояния двигателей внутреннего сгорания сейчас наиболее актуально из-за увеличения числа автомобилей и ужесточения экологических требований. В работе рассмотрены последствия работы неисправного двигателя внутреннего сгорания. Целью работы является обоснование выбора из существующих методов диагностики такого метода который способен помочь наиболее точно и быстро обнаружить неисправность. Для этого в работе подробно рассмотрены современные средства диагностики, выделены принципы работы, достоинства и недостатки. С появлением современных технологий давно известный метод оценки состояния двигателей внутреннего сгорания по звуку может стать самым передовым, поскольку исключается человеческий фактор, для обработки сигнала применяется вычислительная техника анализ звукового спектра в которой осуществляется с помощью искусственных нейронных сетей. Применение искусственных нейронных сетей для анализа звукового спектра нашло применение в распознавание речи и для диагностики заболеваний дыхательной системы. В статье рассмотрены механизмы, которые способны генерировать звуковые сигналы во время работы двигателя внутреннего сгорания, некоторые из них фазированы т.е. привязаны к рабочим тактам, некоторые не фазированы. Предложенный способ диагностики позволяет выделить «полезные» звуки из общего числа шумов двигателя, после сравнительного анализа указать на узел звук которого отличается от эталонного, исправного. Научная новизна состоит в том, что процесс диагностики становится автоматизированным, все звуки, снятые датчиками, обрабатывается в ЭВМ или специальном сканере, на дисплей выводится информация о состоянии тех или иных узлов, в отличие от традиционных методов где диагностика осуществляется визуально или на слух. Таким образом повышается точность диагностики и снижается общая трудоемкость за счет исключения частичной или полной разборки двигателя.

Двигатель внутреннего сгорания; диагностика; звук; вибромониторинг; искусственная нейронная сеть.

A.V. Logunov, A.L. Beresnev

VIBRATION MONITORING OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE

The work is devoted to the problem of diagnostics of automotive internal combustion engines. The problem of monitoring the state of internal combustion engine is now most relevant due to the increase in the number of cars and the tightening of environmental requirements. In the work the consequences of operation of faulty internal combustion engine are considered. The purpose of the work is to justify the choice from existing diagnostic methods of such a method, which can help to detect the fault most accurately and quickly. For this purpose, the work details modern diagnostic tools, highlights the principles of work, advantages and disadvantages. With the advent of modern technologies, the long-known method of estimating the state of internal combustion engine by sound can become the most advanced, as the human factor is excluded, for signal processing the computational technique of analysis of the audio spectrum in which is carried out with the help of artificial neural networks is used. The use of artificial neural networks for sound spectrum analysis has found application in speech recognition and for diagnosis of respiratory system diseases. The article considers mechanisms that are capable of generating sound signals during internal combustion engine operation, some of them are phased, i.e. they are tied to operating cycles, some are not phased. The proposed diagnostic technique allows to distinguish "useful" sounds from the total number of internal combustion engine noises, after comparative analysis to point to the node the sound of which differs from the reference, serviceable one. Scientific novelty consists in the fact that the diagnostic process becomes automated, all sounds captured by sensors are processed in a computer or a special scanner, the display shows information about the condi-

tion of certain nodes, unlike traditional methods where the diagnosis is carried out visually or by ear. This increases diagnostic accuracy and reduces overall labor intensity by avoiding partial or complete engine disassembly.

Internal combustion engine; diagnostics; sound; vibromonitoring; artificial neural network.

Введение. Диагностика и обнаружение неисправностей современных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является не простой задачей из-за сложной конструкции. Диагностика технического состояния ДВС в процессе эксплуатации обеспечивает, с одной стороны, надежность и безотказность работы за счет своевременного технического обслуживания и ремонта и, с другой стороны, обеспечивает полную реализацию ресурса узлов ДВС, что способствует снижению затрат, повышению экономических и экологических показателей ДВС.

Неисправный ДВС является повышенным источником вредных веществ – химических соединений, содержащихся в отработавших газах (ОГ), загрязняющих окружающую среду и оказывающих неблагоприятное воздействие на здоровье человека (и живые организмы). В ОГ двигателей внутреннего сгорания содержится большое число химических соединений (более 250), опасных для здоровья человека. Время, в течение которого вещества, содержащиеся в ОГ ДВС, сохраняют свою химическую активность в условиях окружающей среды, колеблется от нескольких минут до нескольких (3...6) лет. И в течение всего срока существования эти вредные выбросы могут оказывать неблагоприятное воздействие на природу и население загрязняемых территорий. В целом по характеру взаимодействия с организмом человека (и животных) химические вещества и соединения, содержащиеся в ОГ ДВС, можно подразделить на токсичные (обладающие выраженным неблагоприятным воздействием) – оксид углерода, углеводороды, оксиды азота и серы, альдегиды, сероводород, сажа и др. и нетоксичные – азот, кислород, водород, водяные пары, диоксид углерода (углекислый газ). Кроме того, в составе токсичных веществ выделяют подгруппу полициклических ароматических углеводородов, обладающих выраженной канцерогенной активностью, одним из основных компонентов которой является мощный канцероген – бенз-(а)-пирен [1]. При неправильной работе ДВС выбросы вредных веществ существенно увеличиваются, именно поэтому необходима своевременная диагностика.

Интенсивный рост парка автотранспортных средств предопределяет рост значимости проблемы шумового загрязнения среды обитания человека. Одним из наиболее активных источников шума автомобиля является ДВС [2].

Под шумом ДВС понимается акустическое излучение, производимое им при работе. Шум двигателя измеряют величиной уровня и спектром. Это характеристики шума ДВС в точке пространства. Двигатель как источник акустического излучения характеризуют значением излучаемой акустической мощности, ее спектром и диаграммой направленности излучения. Резко возрастает шум от двигателя в момент его запуска и прогрева (до 10 дБ). Движение автомобиля на первой скорости (до 40 км/ч) способно вызывать излишний расход топлива, при этом шум двигателя в 2 раза превышает шум, который создается им на второй скорости. Резкое торможение автомобиля, особенно при движении на большой скорости, вызывает значительный шум. Шум заметно снижается в том случае, если скорость движения гасится за счёт торможения двигателем до момента включения ножного тормоза. За последнее время средний уровень шума, производимый транспортом, увеличился на 12–14 дБ. Чрезмерный шум может явиться причиной нервного 93 истощения, вегетативного невроза, психической угнетённости, язвенной болезни, расстройства эндокринной и сердечно-сосудистой систем [3]. Шум неисправного ДВС, соответственно, более негативно сказывается на здоровье, поэтому это еще одна причина из-за которой эксплуатация автомобиля с неисправностями должна быть прекращена, выполнена правильная диагностика и ремонт.

Обзор существующих методов диагностики. На данный момент традиционные способы диагностики и контроля работы автомобильного двигателя можно осуществить с помощью: диагностических сканеров (переносных и на базе ПК), газоанализаторов, а также мотортестеров (осциллографов).

Сканер – устройство, которое подключается через диагностический разъем к электронному блоку управления (ЭБУ) автомобиля для обмена данными. Стандартный сканер обеспечивает доступ к кодам регистратора неисправностей, доступ к текущей информации в ЭБУ, запись параметров во время ездовых испытаний, управление исполнительными механизмами. Сканер является необходимым инструментом для диагностики автомобильных электронных систем. Современные сканеры обеспечивают получение большого объема внутрисистемной диагностической информации, которую трудно или невозможно получить иным путем. Портативность сканера позволяет использовать его и при ездовых испытаниях. Получение информации в реальном времени облегчает обнаружение нерегулярных (непостоянных), неисправностей. Одной из, наиболее полезных возможностей сканера является запись данных в электронную память сканера во время ездовых испытаний. После возвращения в цех эти данные могут быть выведены на дисплей для анализа [4]. Основным недостатком использования при диагностике ДВС различных сканеров – это невозможность определить точно с чем связана поломка. К примеру, ошибка в регистре событий ЭБУ ДВС автомобилей группы VAG: 17748 - датчик распредвала-G40/датчик коленвала-G28: несоответствие сигналов. У данной ошибки может быть несколько причин: растяжение цепи привода газораспределительного механизма (ГРМ), неправильная установка меток фаз ГРМ, неисправность датчика распредвала/ датчик коленвала, неисправность системы регулирования фаз. В большинстве случаев чтобы узнать в чем причина ошибки, понадобится частичная разборка ДВС. Таким образом можно сделать вывод о том, что сканерная диагностика является неточным инструментом, и дает косвенное представление о неисправности.

Автомобильный газоанализатор – устройство, позволяющее с высокой степенью точности определить состав выхлопных газов, получаемых в результате работы двигателя внутреннего сгорания. Современные четырехкомпонентные газоанализаторы измеряют концентрацию CO, HC, CO₂, и O₂. Концентрация кислорода определяется при помощи электрохимического датчика. Так же определяется содержание в выхлопе оксидов азота NO_x в более сложных, пятикомпонентных приборах. Преимущество приборов этого уровня заключается в том, что они позволяют расчетным путем определить исходный состав топливной смеси даже для двигателей, выхлопная система которых оборудована катализатором. Помимо этого, они предоставляют диагностику несколько дополнительных параметров, совокупный анализ которых позволяет глубже понять характер процессов, происходящих в двигателе [5]. Так же, как и в случае со сканерной диагностикой газоанализаторы не дают точной картины о состоянии узлов ДВС.

Мотортестер это прибор, предназначенный для поиска неисправностей в различных автомобильных системах с бензиновым двигателем. Прибор позволяет диагностировать двигатели с механическим или электронным распределением энергии, т.е. с классической электронной или микропроцессорной системой зажигания, а также двигатели, оборудованные как карбюратором, так и системой впрыска [6]. Мотортестер позволяет одновременно измерять большое количество электрических сигналов в любых электроцепях, включая высоковольтные. Также он вполне в состоянии отображать форму и характер изменения этих сигналов во времени в режиме осциллографа или осциллографа. И еще мотортестер способен оказывать на двигатель испытательные воздействия и на основании анализа его реакции можно сделать вывод о состоянии двигательной механики. Мотортестер

как диагностический инструмент должен выполнять функцию осциллографа. Осциллограф – прибор, который позволяет увидеть форму импульсного напряжения или тока и измерить его параметры. Вторая группа функций, которая отличает мотортестер от обычного осциллографа, это расчетные функции. С их помощью производят расчеты на основании снятых с двигателя параметров. Примером такого расчета может быть баланс мощности, эффективность по цилиндрам. Третья функция – это измерение неэлектрических сигналов, к которым следует отнести в первую очередь давление [7]. Основным недостатком использования мотортестеров в диагностике – является то, что это просто измерительный прибор, полученные с помощью него графики еще нужно правильно расшифровать.

Один из перспективных методов диагностики – это виброакустический метод диагностики ДВС. Суть данного метода заключается в регистрации звуковых волн вибродатчиком, а также съем показаний с датчика давления в цилиндре и с датчика на свече первого цилиндра, использующегося для синхронизации сигнала вибродатчика. Затем частотный спектр записанного звукового сигнала разбивается на интервалы, число которых при первой итерации цикла поиска неисправности полагается равным трем. После этого происходит выбор очередного интервала сигнала и разложение его в ряд Фурье. На основании данных с датчика детонации определяется, фазирован сигнал или нет. Если сигнал фазирован, то определяется фаза всплеска, а затем выполняется прогнозирование источника сигнала и его вейвлет-преобразование. Если же сигнал не фазирован, то сначала к нему применяется вейвлет-преобразование, а затем по полученным данным выявляется частота максимальной амплитуды.

Результаты обработки звукового сигнала используются для определения неисправности. При этом в зависимости от типа для фазированного сигнала выполняются процедуры: определение фазы всплеска, прогноз источника сигнала и вейвлет-преобразование, а для нефазированного – вейвлет-преобразование, определение точки излучения максимального уровня сигнала и поиск сходства с образцами сигналов в базе данных. С помощью метода виброакустического анализа при диагностике ДВС могут быть определены следующие параметры: пропуски воспламенения; угловое положение коленчатого вала (КВ) и неисправности в основных парах сопряжения ДВС. Кроме того, при данном подходе для определения большинства дефектов нет необходимости выбора промежутков для разбиения реализаций на отдельные короткие участки равной длины [8].

Современный ДВС – сложное техническое устройство, содержащие ряд агрегатов и механизмов. Все эти механизмы являются источниками шумов, стуков, появляющихся из-за процессов, происходящих в ДВС. Уровень шума двигателя возрастает по мере износа его деталей, из-за выхода из строя деталей или неисправности отдельных механизмов и систем. В основном, стуки и шумы являются следствием ослабления креплений и посадок, увеличения зазоров в сопряжении деталей. Выделим наиболее важные группы механизмов ДВС, которые при выходе из строя начинают издавать нехарактерные для нормальной работы звуки, неисправность которых, возможно определить только с помощью частичной или полной разборкой: цилиндро-поршневая группа (ЦПГ), газораспределительный механизм (ГРМ), подшипники.

В состав ЦПГ входят поршень с компрессионными и маслосъемными кольцами, которые называются поршневыми кольцами, а также гильза цилиндра. Стук в ЦПГ возникает по разным причинам:

- ♦ перекося поршня из-за слишком большого зазора. Слишком большое отверстие цилиндра, износ или деформация юбки приводят к перекося поршня, которому способствуют маятниковое движение шатуна и перекладка поршня в цилиндре. При этом головка поршня сильно ударяется о рабочую поверхность цилиндра;

◆ несоблюдение направления сборки поршня. Для перекидки поршня перед верхней мертвой точкой и перед началом такта расширения ось поршневого пальца смещена на несколько миллиметров в сторону нагруженной стороны поршня. Если поршень вводится в цилиндр смещенным на 180° и поршневой палец из-за смещается не в ту сторону, то перекидка поршня осуществляется в неправильный момент. Качание поршня в результате этого происходит сильнее и громче;

◆ перекос поршня из-за тяжелого хода опоры шатуна. Зазор между поршневым пальцем и втулкой нижней головки шатуна может быть слишком малым или может исчезнуть в результате заклинивания или перекоса из-за несоосности шатуна (изгиб и скручивание);

◆ удары поршня в направлении пальца. Причиной боковых ударов поршня об отверстие цилиндра в большинстве случаев является несоосный шатун (изгиб или особенно скручивание): поршень выполняет качающееся движение во время своего хода в продольной оси двигателя и в результате этого попеременно ударяется о цилиндр. Несимметричные шатуны или эксцентрическая опора поршня в шатуне имеют тот же эффект;

◆ попеременные удары поршневого пальца о стопоры поршневого пальца. Осевое смещение поршневого пальца всегда является следствием несоосности между осью поршневого пальца и осью коленчатого вала. Как описано выше, изгиб или скручивание шатуна, а также асимметрия в шатуне являются наиболее частыми причинами таких дефектов. Слишком большой люфт шатунного подшипника (шатунная шейка на коленчатом валу) может вызвать боковое качание шатуна, особенно при низкой частоте вращения. Из-за этого происходит перекос поршневого пальца в головке шатуна, и он начинает совершать маятниковое движение в отверстии для поршневого пальца. При этом поршневой палец ударяется о стопоры пальца.

Неисправности в ЦПГ приводят к увеличенному расходу масла, что негативно сказывается на экологии.

Четырехтактные автомобильные двигатели имеют клапанные ГРМ, в которых впуск горючей смеси (воздуха) и выпуск отработавших газов происходит при помощи впускных и выпускных клапанов [9]. Основными элементами газораспределительного механизма являются распределительный вал, впускные и выпускные клапаны с пружинами, крепежными деталями и направляющими втулками, привод распределительного вала, а также детали (толкатели, штанги, коромысла и др.), обеспечивающие передачу перемещения от распределительного вала к клапанам.

Стук в ГРМ возникает по следующим причинам:

◆ стук клапанов – стук клапана о седло из-за повышенной скорости посадки клапана в седло (посадка с ударом). Повышение скорости посадки происходит при отклонении зазоров в сопряжении «регулирующая шайба – затылок кулачка распределителя» в большую сторону от требований КД;

◆ стук направляющих втулок клапанов – стук клапана о седло и о направляющую втулку из-за значимого радиального смещения клапана в момент посадки в седло. Смещение становится значимым при износе направляющей втулки выпускного или впускного клапана до зазора «втулка-клапан» более 0,3 мм;

◆ стук толкателя в направляющей – стук толкателя о стенки направляющего отверстия в головке цилиндров (ГЦ) при радиальном перемещении толкателя из-за повышенного радиального зазора между деталями;

◆ стук регулировочной шайбы в толкателе;

◆ стук распределительного вала.

Так же стоит выделить еще одну причину стука – растянутая цепь в приводе ГРМ. Все эти неисправности приводят к неполному сгоранию топлива, что очень сильно влияет на экологию, к этому добавляется потеря динамики автомобиля. Определить вышедшие из строя узлы ГРМ сложно, диагностика сопровождается частичной разборкой ДВС.

Еще одними источниками постороннего звука в ДВС являются подшипники качения, эти звуки не связаны с рабочими тактами ДВС, неисправность можно обнаружить только по звуку либо при визуальном осмотре.

Описанные выше неисправности ДВС возможно обнаружить с помощью виброакустического анализа [10–14]. На поверхности ДВС закрепляется пьезоэлектрические датчики (рис. 1), которые подсоединяются к микрофонному входу звуковой карты компьютера. Звук с работающего двигателя записывается в память.

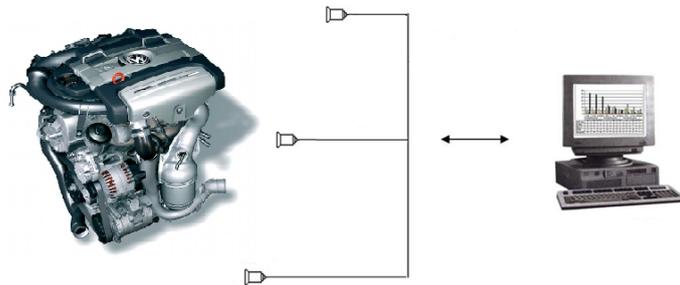


Рис. 1. Схематичное представление диагностики ДВС с помощью виброакустического анализа

Сохраненные в памяти компьютера данные, можно обрабатывать с помощью программного цифрового фильтра. Цифровой параметрический фильтр имеет все необходимые регулировки – выбор частоты пропускания, регулировки полосы пропускания и добротности. Таким образом, можно выделить именно интересующий звук, отсекая все фоновые шумы [15]. Для анализа полученного звукового спектра возможно использовать нейронную сеть [16]. Сейчас использование искусственных нейронных сетей становится актуальным решением для многих задач, т.к. существующие методы вычисления слишком трудоемки и малоэффективны. Одним из достоинств нейронных сетей является то, что становится возможным определить результат значений, которые не являются частью экспериментальных данных. Типовые задачи, решаемые с помощью нейронных сетей и нейрокомпьютеров: автоматизация процесса классификации; автоматизация прогнозирования; автоматизация процесса предсказания; автоматизация процесса принятия решений; управление; кодирование и декодирование информации; аппроксимация зависимостей и др. [17].

Описание эксперимента. Одними из наиболее ответственных механизмов ДВС являются подшипники, применяемые в газораспределительном механизме; в качестве опоры коленчатого вала; устанавливаются в шатунах; в сцеплении; в системе охлаждения для водяного насоса; так же в различном навесном оборудовании генераторы, насосы гидроусилителя руля, компрессоры кондиционера и т.д.

Неисправный подшипник может привести к выходу из строя оборудования или ДВС в целом, поэтому своевременное определение неисправности поможет избежать дорогостоящего ремонта. Главным признаком поломки подшипника является появление постороннего звука при его вращении. Для определения неисправности необходимо придерживаться следующего алгоритма:

- ◆ Необходимо записать звук.
- ◆ Следующим этапом будет преобразование полученного сигнала в спектрограммы, это преобразование необходимо для извлечения признаков.
- ◆ Далее извлекаем признаки из спектрограммы: спектральный центроид, MFCC, частоту пересечения нуля, частоты цветности и спад спектра.
- ◆ Обрабатываем и разбиваем данные на наборы для обучения и тестирования.
- ◆ Далее создаем модель нейронной сети, которая поможет идентифицировать неисправность.
- ◆ Оцениваем точность модели.

Экспериментальная часть. Экспериментальная обработка аудиосигнала подшипника выполняется с помощью высокоуровневого языка программирования общего назначения Python. Для эксперимента получены 4 аудиосигнала (2 – неисправного подшипника, 2 – исправного), все дорожки – это монофонические аудиофайлы 22 кГц, длительностью по 10 секунд в формате .wav.

Каждый аудиосигнал состоит из множества признаков. Спектральные (частотные) признаки получают путем преобразования временного сигнала в частотную область с помощью преобразования Фурье. Анализ научных публикаций, в которых отражены результаты исследований голоса и звучащей речи, а также существующих систем распознавания звуков и музыки, помог определить ряд важных признаков аудиосигнала, которые позволят решить нашу задачу [18–20].

Для работы с нейронными сетями используется бесплатный сервис Google Colab, предоставляющий GPU и TPU в качестве сред выполнения.

В первую очередь нужно преобразовать аудиофайлы в изображения формата PNG (спектрограммы). Затем из них нужно извлечь значимые характеристики: MFCC, спектральный центроид, скорость пересечения нуля, частоты цветности, спад спектра. После извлечения, признаки можно добавить в файл CSV, который используется нейронной сетью для классификации.

Ниже приведены полученные спектрограммы для всех четырех аудиосигналов:

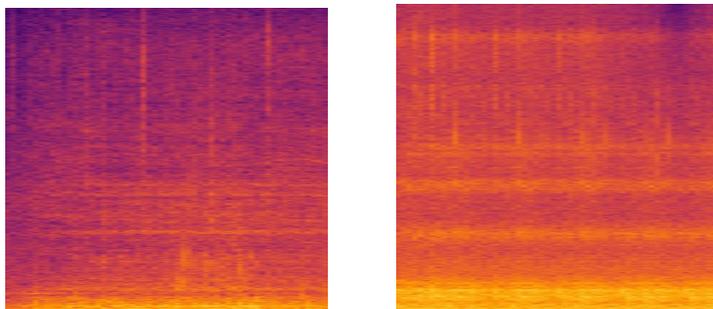


Рис. 2. Спектрограммы неисправных подшипников № 1 и № 2

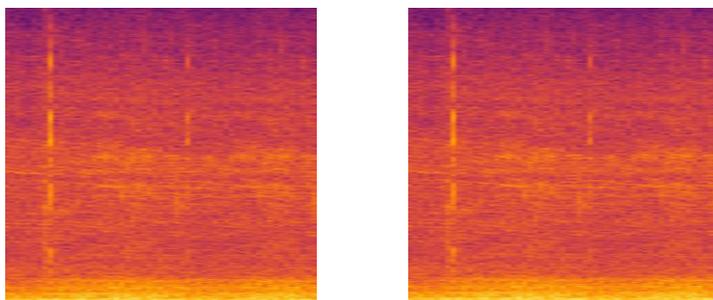


Рис. 3. Спектрограммы исправных подшипников № 3 и № 4

Извлекаем признаки из спектрограммы: MFCC, спектральный центроид, частоту пересечения нуля, частоты цветности и спад спектра.

```

file = open('dataset.csv', 'w', newline='')
with file:
    writer = csv.writer(file)
    writer.writerow(header)
    test = 'badsound goodsound'.split()
    for g in test:
        for filename in os.listdir(f'./drive/My Drive/test/{g}'):
            songname = f'./drive/My Drive/test/{g}/{filename}'
            y, sr = librosa.load(songname, mono=True, duration=30)
            rmse = librosa.feature.rms(y=y)
            chroma_stft = librosa.feature.chroma_stft(y=y, sr=sr)
            spec_cent = librosa.feature.spectral_centroid(y=y, sr=sr)
            spec_bw = librosa.feature.spectral_bandwidth(y=y, sr=sr)
            rolloff = librosa.feature.spectral_rolloff(y=y, sr=sr)
            zcr = librosa.feature.zero_crossing_rate(y)
            mfcc = librosa.feature.mfcc(y=y, sr=sr)
            to_append = f'{filename} {np.mean(chroma_stft)} {np.mean(rmse)} {np.mean(spec_cent)} {np.mean(spec_bw)} {np.mean(zcr)} {np.mean(mfcc)}'
            for e in mfcc:
                to_append += f' {np.mean(e)}'
            to_append += f' {g}'
            file = open('dataset.csv', 'a', newline='')
            with file:
                writer = csv.writer(file)
                writer.writerow(to_append.split())
    
```

Рис. 4. Окно программы Google Colab (извлечение признаков)

Выполняем предварительную обработку данных, которая включает загрузку данных CSV, создание меток, масштабирование признаков и разбивку данных на наборы для обучения и тестирования.

Создаем модель нейронной сети и оценим ее точность:

```

model = Sequential()
model.add(layers.Dense(256, activation='relu', input_shape=(X_train.shape[1],)))
model.add(layers.Dense(128, activation='relu'))
model.add(layers.Dense(64, activation='relu'))
model.add(layers.Dense(10, activation='softmax'))
model.compile(optimizer='adam',
              loss='sparse_categorical_crossentropy',
              metrics=['accuracy'])

classifier = model.fit(X_train,
                      y_train,
                      epochs=100,
                      batch_size=128)
    
```

Рис. 5. Окно программы Google Colab (модель нейронной сети)

результат оценки:

```

Epoch 1/100
1/1 [=====] - 1s 818ms/step - loss: 2.4139 - accuracy: 0.3333
    
```

```

-----
Epoch 100/100
1/1 [=====] - 0s 8ms/step - loss: 2.4556e-05 - accuracy: 1.0000
    
```

С целью экономии места представлены 1 и 100 эпохи оценки точности, после 100 эпох точность составляет 1. Такой высокий результат объясняется малым количеством экспериментальных образцов.

В табл. 1 представлены разбитые на наборы данные для обучения и тестирования, а также результат моделирования работы нейронной сети.

Таблица 1

Данные для обучения и тестирования

filename	chroma_stft	rmse	spectral_centroid
bearing1.wav	0.4233435094356537	0.09819794446229935	1335.7908870526746
bearing2.wav	0.38575297594070435	0.1195993423461914	1004.2208908491176
bearing3.wav	0.49449190497398376	0.01362406276166439	2371.9399163994094
bearing4.wav	0.49449190497398376	0.01362406276166439	2371.9399163994094

продолжение табл. 1

rolloff	zero_crossing_rate	mfcc	label
2972.8004226508374	0.04304430391166282	-	badsound
1310.3923841657045	0.038296811850461895	-173.9340057373047	badsound
5541.244091007506	0.09866889795034642	-298.5201721191406	goodsound
5541.244091007506	0.09866889795034642	-298.5201721191406	goodsound

В табл. 1 сведены значения вычисленных признаков всех аудиосигналов, в колонке *label* представлен результат классификации: bearing1.wav и bearing2.wav – **badsound**, а bearing3.wav и bearing4.wav – **goodsound**, заранее было известно, что подшипники №1 и №2 неисправны, а подшипники №3 и №4 исправны, таким образом представленная модель нейронной сети смогла верно классифицировать аудиосигналы.

Выводы. В работе рассмотрены проблемы влияния работы неисправного ДВС на человека и окружающую среду, представлены существующие методы поиска неисправностей. Проблема актуальна поскольку до сих пор нет точного и безотказного алгоритма определения механических поломок ДВС. Представленный в эксперименте алгоритм позволит классифицировать различные аудиосигналы ДВС и выделять среди общего количества звук неисправного узла. Также для широкого практического применения необходимо создать целую базу аудиосигналов для обучения нейронной сети, поскольку в данный момент количество экспериментальных образцов недостаточно для точной оценки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов // Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания. – 2005.
2. Шатров М.Г. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие. – МАДИ, 2014.
3. Дрябжинский О.Е. Негативное воздействие автотранспорта. Проблема шумового загрязнения // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2015. – № 8-4. – С. 91-94.
4. Чернявский Н.И. Лабораторный практикум по междисциплинарному курсу «Техническое обслуживание и ремонт автомобильного электрооборудования». – Тольятти: Изд-во ПВГУС, 2016. – 72 с.
5. Береснев А.Л., Береснев М.А. Практикум по лабораторным работам «Диагностика ДВС с помощью газоанализатора». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011.
6. Береснев А.Л., Береснев М.А., Бурьков Д.В. Практикум по лабораторным работам «Диагностика электрооборудования ДВС с помощью мотортестера». Для студентов специальности 140607. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008.
7. <http://www.adis-spb.ru/stati/417-o-motor-testerah.html> (дата обращения 25.05.2020).
8. Береснев А.Л., Береснев М.А. Виброакустический метод диагностики двигателя внутреннего сгорания // Теоретический и прикладной научно-технический журнал мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 6 (111). – С. 27-32.
9. Соловьев Д.В., Огороднов С.М. Газораспределительный механизм двигателя. – Н. Новгород, 2011.

10. Czech P., Lazarz B., Madej H., Wojnar G. Vibration diagnosis of car motor engines // Acta technica corviniensis – bulletin of engineering. – 2010.
11. Scheffer C., Girdhar P. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance // Newnes. – 2004.
12. Patel V.N., Tandon N., Pandey R. K. Hindawi publishing corporation advances in acoustics and vibration // Experimental study for vibration behaviors of locally defective deep groove ball bearings under dynamic radial load. – 2014.
13. Burdzik R., Doleček R. Research of vibration distribution in vehicle constructive // Perner's contacts. – 2012. – P. 16-26.
14. Wang, X. Vehicle noise and vibration refinement, woodhead publishing limited, Cambridge, 2010.
15. Deulgaonkar, V.R. Review and Diagnostics of noise and vibrations in automobiles // International journal of modern engineering research (IJMER). – Vol. 1, No. 2. – P-242-246.
16. Жеретинцев И.А., Глушков С.В., Жеретинцева Н.Н. Нейросетевая методика технической диагностики двигателей внутреннего сгорания по спектральному анализу шумовых характеристик // Вестник морского государственного университета. – 2010. – № 37.
17. Patrick Sincebaugh, William Green. A neural network based diagnostic test system for armored vehicle shock absorbers expert systems with applications. – 1996. – Vol. 11, No. 2. – P. 237-244.
18. Круз П.Г. Нейронные сети и нейрокомпьютеры: учеб. пособие по курсу «Микропроцессоры». – М.: Изд-во МЭИ, 2002.
19. Бураков М.В. Нейронные сети и нейроконтроллеры: учеб. пособие. – СПб.: ГУАП, 2013.
20. Гафаров Ф.М. Искусственные нейронные сети и приложения: учеб. пособие. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018.
21. Вакуленко С.А., Жихарева А.А. Практический курс по нейронным сетям. – СПб.: Университет ИТМО, 2018.

REFERENCES

1. Sharoglazov B.A., Farafontov M.F., Klement'ev V.V. Dvigateli vnutrennego sgoraniya: teoriya, modelirovanie i raschet protsessov [Internal combustion engines: theory, modeling and calculation of processes] *Teoriya rabochikh protsessov i modelirovanie protsessov v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya* [Theory of working processes and modeling of processes in internal combustion engines], 2005.
2. Shatrov M.G. Shum avtomobil'nykh dvigateley vnutrennego sgoraniya: ucheb. posobie [Noise of automobile internal combustion engines: a textbook]. MADI, 2014.
3. Dryabzhinskiy O.E. Negativnoe vozdeystvie avtotransporta. Problema shumovogo zagryazneniya [Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologiy. – 2015. – № 8-4. – S. 91-94.
4. Chernyavskiy N.I. Laboratornyy praktikum po mezhdistsiplinarnomu kursu «Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont avtomobil'nogo elektrooborudovaniya» [Laboratory workshop on the interdisciplinary course "Maintenance and repair of automotive electrical equipment"]. Tol'yatti: Izd-vo PVGUS, 2016, 72 p.
5. Beresnev A.L., Beresnev M.A. Praktikum po laboratornym rabotam «Diagnostics DVS s pomoshch'yu gazoanalizatora» [Workshop on laboratory work "Diagnostics of internal combustion engines using a gas analyzer"]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2011.
6. Beresnev A.L., Beresnev M.A., Bur'kov D.V. Praktikum po laboratornym rabotam «Diagnostics elektrooborudovaniya DVS s pomoshch'yu motortestera». Dlya studentov spetsial'nosti 140607 [Workshop on laboratory work "Diagnostics of internal combustion engine electrical equipment using a motor tester". For students of the specialty 140607]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2008.
7. Available at: <http://www.adis-spb.ru/stati/417-o-motor-testerah.html> (accessed 25 May 2020).
8. Bepesnev A.L., Bepesnev M.A. Vibroakusticheskiy metod diagnostiki dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Vibroacoustic method of internal combustion engine diagnostics], *Teoreticheskiy i prikladnoy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Theoretical and applied scientific and technical journal Mechatronics, automation, control], 2010, No. 6 (111), pp. 27-32.
9. Solov'ev D.V., Ogorodnov S.M. Gazoraspredelitel'nyy mekhanizm dvigatelya [The gas distribution mechanism of the engine]. Nizhniy Novgorod, 2011.

10. Czech P., Lazarz B., Madej H., Wojnar G. Vibration diagnosis of car motor engines, *Acta technica corviniensis – bulletin of engineering*, 2010.
11. Scheffer C., Girdhar P. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance, *Newnes*, 2004.
12. Patel V.N., Tandon N., Pandey R. K. Hindawi publishing corporation advances in acoustics and vibration, *Experimental study for vibration behaviors of locally defective deep groove ball bearings under dynamic radial load*, 2014.
13. Burdzik R., Doleček R. Research of vibration distribution in vehicle constructive, *Perner's contacts*, 2012, pp. 16-26.
14. Wang, X. Vehicle noise and vibration refinement, woodhead publishing limited, Cambridge, 2010.
15. Deulgaonkar, V.R. Review and Diagnostics of noise and vibrations in automobiles, *International journal of modern engineering research (IJMER)*, Vol. 1, No. 2, pp-242-246.
16. Zhereintsev I.A., Glushkov S.V., Zhereintseva N.N. Neyrosetevaya metodika tekhnicheskoy diagnostiki dvigateley vnutrennego sgoraniya po spektral'nomu analizu shumovykh kharakteristik [Neural network technique of technical diagnostics of internal combustion engines by spectral analysis of noise characteristics], *Vestnik morskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Maritime State University], 2010, No. 37.
17. Patrick Sincebaugh, William Green. A neural network based diagnostic test system for armored vehicle shock absorbers expert systems with applications, 1996, Vol. 11, No. 2, pp. 237-244.
18. Krug P.G. Neyronnye seti i neyrokomp'yutery: ucheb. posobie po kursu «Mikroprotsessory» [Neural networks and neurocomputers: a textbook on the course "Microprocessors"]. Moscow: Izd-vo MEI, 2002.
19. Burakov M.V. Neyronnye seti i neyrokontrollery: ucheb. posobie [Neural networks and neurocontrollers: a textbook]. Saint Petersburg: GUAP, 2013.
20. Gafarov F.M. Iskusstvennye neyronnye seti i prilozheniya: ucheb. Posobie [Artificial neural networks and applications: a textbook]. Kazan': Izd-vo Kazan. un-ta, 2018.
21. Vakulenko S.A., Zhikhareva A.A. Prakticheskiy kurs po neyronnym setyam [Practical course on neural networks]. Saint Petersburg, 2018.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.И. Дордопуло.

Логунов Артём Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: artem-logunov@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79054586468; аспирант.

Береснев Алексей Леонидович – e-mail: alex_tr6@mail.ru; кафедра электротехники и механики; к.т.н.; доцент.

Logunov Artem Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: artem-logunov@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79054586468; postgraduate.

Beresnev Alexey Leonidovich – e-mail: alex_tr6@mail.ru; the departments of electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 629.07.017

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-170-180

А.С. Болдырев, Л.С. Веревкина, А.Л. Веревкин

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ОТКАЗОБЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ И АГРЕГАТОВ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ГРУППЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Областями применения CALS-технологий принято считать: совершенствование деятельности в области разнородных процессов, происходящих на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) продукции; управление цепочками поставок в течение всего ЖЦ продукции (от создания концепции изделия до его утилизации); электронная интеграция организаций