

УДК 629:004.891

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ВИБРОАКУСТИЧЕСКОМ ДИАГНОСТИРОВАНИИ АВТОМОБИЛЕЙ

Г.А. УВАРОВ
(УЧТП «СБС», Полоцк)

Представлены некоторые сравнительно новые подходы к совершенствованию виброакустического метода диагностирования автомобилей путем использования современных компьютерных средств. Приводятся примеры практического использования прикладных программ обработки звука. Предлагается в виброакустическом диагностировании более широко использовать экспертные системы, основанные на нечеткой логике. Новые экспертные системы позволяют учитывать тонкие классификации и сложные взаимосвязи признаков, которые в явной или неявной субъективной форме принимают во внимание профессионалы в процессе принятия диагностических (прогностических) решений, а также расширить степень практической применимости виброакустического метода применительно к диагностированию автомобилей.

Введение. При эксплуатации автомобилей неизбежно возникают задачи диагностирования, т.е. определения их технического состояния, выявления неисправностей и прогнозирования остаточного ресурса. Совокупность параметров для выявления признаков неисправностей выбирают исходя из требований к точности, трудоемкости и стоимости диагностирования. Необходимость повышения эффективности технической эксплуатации автомобилей предъявляет к качеству процессов диагностирования повышенные требования, это требует дальнейшего развития средств и методов неразрушающего контроля.

При диагностировании автомобилей широкомасштабно может применяться виброакустический метод, основанный на косвенных виброакустических признаках неисправностей. Преимущество использования косвенных параметров при диагностировании заключается в их доступности. Контроль косвенных параметров не требует разборки механизмов и может осуществляться с минимальными подготовительными операциями. Однако обработка результатов косвенных измерений требует глубокого анализа получаемой при этом информации, систематизации и комплексной оценки всей совокупности диагностических данных.

Основная проблема технической диагностики – распознавание и прогнозирование состояния объекта, дефектов его механизмов и элементов в условиях ограниченной информации. Наиболее сложной является задача прогнозирования развития дефектов, ее решение позволяет определять остаточный ресурс безаварийной работы. Выработать научно обоснованные рекомендации, помогающие диагносту-эксперту в его работе, разработать прикладные программно-аппаратные средства, позволяющие повысить точность виброакустического диагностирования применительно к автомобильному транспорту, представляется важной научной задачей.

Цель данного исследования заключалась в более достоверном распознавании дефектов автомобиля на ранней стадии их возникновения и их последующем мониторинге методами виброакустического диагностирования с использованием современных программно-аппаратных средств.

Основная часть. Стремительное внедрение в конструкции автомобилей электроники, несмотря на неоспоримые преимущества, оставляет нерешенными проблемы, связанные с разработкой для них эффективных алгоритмов диагностирования. Теория диагностирования, возникшая в середине прошлого столетия, нуждается сегодня в наполнении потенциалом, предоставляемым компьютерными средствами. Важной научной задачей является интеграция различных средств и методик диагностирования в единые (экспертные) комплексы с целью повышения их эффективности.

Виброакустический метод диагностирования хорош тем, что не требует вмешательства в работающие системы и механизмы автомобиля, позволяя определять дефекты дистанционно. Несмотря на длительную историю своего развития, данный метод применительно к автомобилям до недавних пор характеризовался невысокой степенью объективности. Механизмы автомобиля издают широкий спектр звуков. Колеблющиеся поверхности корпусных деталей распространяют виброакустические волны в прилегающей к ним окружающей среде – других деталях автомобиля и в воздухе. Распознать и правильно интерпретировать информативный сигнал на фоне значительных помех, определить его параметры и сделать правильный прогноз – сложная задача даже для специалиста с большим опытом.

Современные программно-аппаратные средства позволяют значительно расширить возможности данного метода. Однако полностью заменить в виброакустическом диагностировании автомобилей знания, опыт и субъективные ощущения эксперта программно-аппаратными средствами представляется маловероятным. Наиболее перспективным представляется путь создания комбинированных «эрготических экспертных систем», в которых эксперт и программно-аппаратные средства взаимно дополняют друг друга. Для

обоснования данного утверждения необходимо внимательно изучить сенсорные и интеллектуальные возможности человека, а также возможности современных программно-аппаратных средств.

Акустическая информация, поступающая от работающего автомобиля, позволяет выявлять некоторые критические состояния его механизмов. Так, глухие, низкого тона, стуки в нижней части картера двигателя указывают на износ коренных подшипников. Ритмичные звонкие, металлические стуки среднего тона, как правило, вызваны износом шатунных подшипников. При значительном износе поршневых пальцев в верхней части блока цилиндров прослушиваются ритмичные, высокого тона, с металлическим оттенком, стуки. Регулярные металлические стуки в области крышки клапанов головки цилиндров указывают на увеличенные зазоры в клапанном механизме. Барабнящие стуки в подвеске указывают на предельный износ сайлентблоков, шелест или потрескивание в ступице колеса указывает на разрушение подшипников и т.д.

Важным свойством восприятия звука человеком является его способность довольно быстро и точно определять направление на источник сигнала. Способность локализовывать источник звука при слушании двумя ушами называется бинауральным свойством слуха. Это объясняется тем, что если источник звука не находится прямо перед слушателем, звуковые колебания, воздействующие на правое и левое ухо, во-первых, имеют некоторый сдвиг по фазе (вследствие разницы длины пути до одного и другого уха), а во-вторых, разницу в уровнях (вследствие экранирующего действия головы и вызванных этим дифракционных явлений). В области низких частот преимущественное значение имеет различие фаз звуковых колебаний, в области более высоких – разница в уровнях. Это становится понятным, если сравнить поперечник головы (расстояние между ушами) с длиной звуковых волн на низких и высоких частотах слышимого диапазона.

Направление на источник звука определяется человеком «на слух» более точно (с погрешностью до 3...4 градусов), если источник незначительно смещен в сторону. Погрешность увеличивается при расположении источника сбоку или позади слушателя. Знание данной особенности позволяет достаточно точно локализовывать источник акустического сигнала при диагностировании автомобиля. Для этого поворотом головы необходимо найти положение, при котором сигнал будет одинаково восприниматься обоими ушами. Для проверки направления на источник акустического сигнала необходимо немного поворачивать голову (на 5...10 градусов) влево и вправо, добиваясь попеременного симметричного изменения громкости звука.

Особенно важным в виброакустической диагностике является знание особенностей адаптации слуха человека по времени, а также свойств слуховой памяти. Во-первых, слух человека обладает некоторой сенсорной «инертностью» – реакция наступает только по истечении определенного времени накопления воздействующего фактора. Ощущение воспринимаемой громкости устанавливается только при длительности воздействия порядка не менее 200 мс. Это время называется временем адаптации слуха на громкость. Отдельные кратковременные максимумы звукового давления, называемые пиковыми значениями, если длительность их существования меньше времени адаптации слуха, не вызывают соответствующего слухового ощущения. Так, два следующих друг за другом звуковых сигнала с перерывом, не превышающим 50 мс, воспринимаются слитно, при перерыве, превышающем это время – раздельно [1].

Можно заключить, что время порядка 50 мс характеризует слуховую память человека. Способность накопления воздействующего на слуховой аппарат фактора и наличие слуховой памяти позволяют сделать вывод в том, что слуховое ощущение в некоторый момент времени определяется не только энергией воздействия в этот момент, но и предшествующими ее значениями за некоторый предшествующий период. При этом влияние этих предшествующих значений сказывается тем меньше, чем больше они удалены в прошлое.

Коленчатый вал двигателя автомобиля вращается с частотой от 600 до 6000 мин⁻¹. За время одного оборота коленчатого вала четырехтактного двигателя в каждом его цилиндре происходит два последовательных такта работы, сопровождающиеся быстро происходящими процессами (открытия и закрытия клапанов, впрыском топлива и т.д.). При скорости работы двигателя 900 об/мин один оборот коленчатого вала происходит за 67 мс, один такт – за 34 мс. Период между отдельными тактами в цилиндрах двигателя едва различим. Услышать кратковременные пиковые сигналы, а также расслышать отдельные, близко отстоящие сигналы возможно путем использования компьютерных программно-аппаратных средств. Акустические редакторы позволяют как ускорять (обычно до 10 раз), так и замедлять (до 100 раз) предварительно записанные в компьютер акустические сигналы. Это позволяет расслышать и увидеть в графическом виде на экране компьютера кратковременные (пиковые) акустические сигналы, сопровождающие работу некоторых систем и механизмов автомобильного двигателя.

При виброакустическом диагностировании традиционно используют стетоскоп (или фонендоскоп). Механический стетоскоп позволяет посредством прикладывания заостренного конца металлического стержня к некоторой детали и другого – к уху, выделить излучаемый поверхностью заданной дета-

ли акустический сигнал и доставить его к слуховым рецепторам. Электронный стетоскоп кроме этого позволяет менять силу выделенного сигнала, добиваясь его лучшего распознавания.

Интенсивность звука изменяется пропорционально квадрату звукового давления или колебательной скорости. Если силу звука чистого тона увеличивать в десять раз, то каждому десятикратному увеличению интенсивности звука будет соответствовать субъективно ощущаемое возрастание громкости на одну ступень. Ступень изменения громкости, соответствующая десятикратному изменению силы звука, составляет один бел (Б). Один децибел соответствует изменению силы звука приблизительно на 26 %, что для сигнала частотой 1 кГц в среднем оценивается на слух как едва заметное изменение громкости. Следует заметить, что по данным субъективно-статистических экспертиз ступень изменения громкости в 1 б воспринимается на слух как увеличение громкости сигнала вдвое. Одному децибелу соответствует изменение звукового давления и колебательной скорости в 1,12 раза. При частотах ниже 20 Гц или выше 20 кГц слышимость отсутствует при любых значениях звукового давления. Электронные средства обработки сигналов позволяют выделять (отфильтровывать) заданные частотные полосы, изменять силу сигнала в пределах от -100 до $+20$ дБ, а также изменять частоту сигнала. Наибольшие возможности в этом направлении предоставляют цифровые графические эквалайзеры являющиеся в настоящее время неотъемлемым атрибутом большинства программ обработки звука (рис. 1).

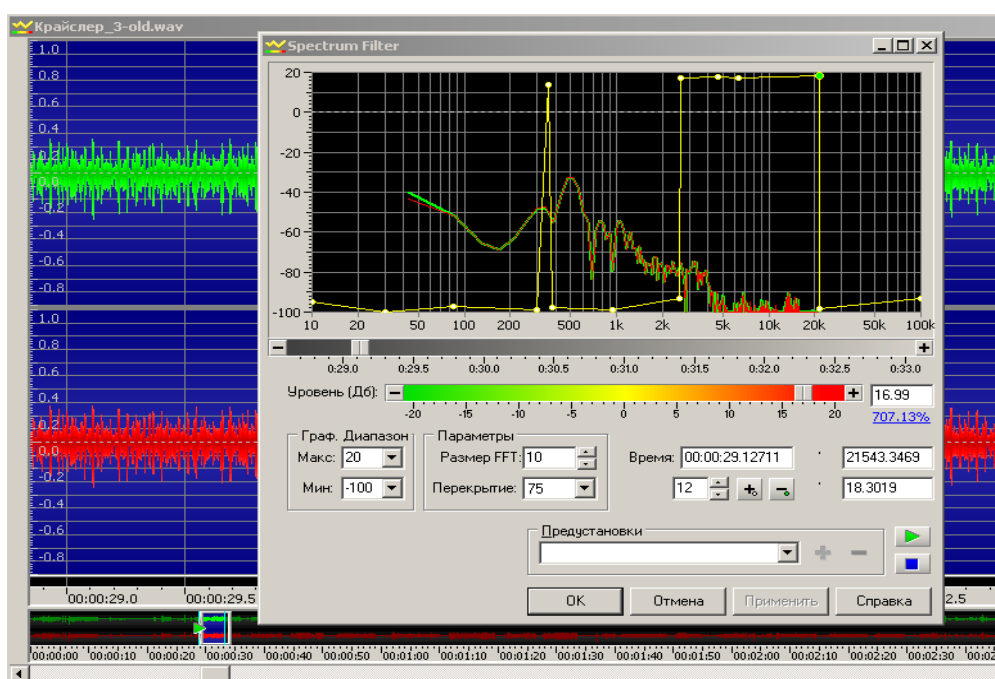


Рис. 1. Графический эквалайзер программы «GoldWave 5.55»

Необходимо отметить особо высокую спектральную чувствительность органов слуха человека, а также высокую способность мозга анализировать непрерывный поток акустических сигналов. Слух человека способен в широких пределах приспосабливаться к значительному шумовому фону, генерируемому большим числом деталей автомобиля, выборочно выделяя из него полезные сигналы. Минимальное относительное изменение частоты, которое ухо человека способно отметить как изменение высоты тона, определяет дифференциальный порог слышимости по частоте. Дифференциальный порог зависит от исходного значения частоты. Так, для частот меньше 500 Гц дифференциальный порог слышимости по частоте выше 1 %, для средних частот – 0,2...0,3 %, для частот больше 4 кГц – дифференциальный порог превышает 0,4...0,5 %. Кроме этого, отмечаемое слухом минимальное изменение частоты зависит от амплитуды колебаний и скорости (Ω) девиации (изменения относительно среднего значения) частоты колебаний. Например, для частоты 1 кГц дифференциальный порог практически не меняется и остается равным 0,2...0,3 %, если изменение частоты 1,0...1,5 Гц около среднего значения 1 кГц происходит со скоростью, не превышающей 5 Гц. При $\Omega > 5$ Гц дифференциальный порог повышается [1]. Использование цифровых частотных фильтров повышает разборчивость полезного сигнала.

Особенностью слухового восприятия является сокращенное восприятие слушателем (в сравнении с действительным) диапазона частот при частотно независимом изменении уровня интенсивности звука. Например, при силе звука 60 дБ создаваемый при этом уровень субъективного восприятия громкости

будет различен на разных частотах, причем частоты ниже приблизительно 30 Гц слышны не будут. При силе звука 40 дБ не слышны будут частоты ниже 50 Гц. Таким образом, снижение интенсивности звука приводит к более ослабленному восприятию низких частот.

Другая особенность субъективного слухового восприятия заключается в том, что при одновременном воздействии на ухо двух звуковых колебаний чувствительность уха к одному звуку при наличии другого уменьшается. Повышение порога слышимости одного звука в присутствии другого называется маскировкой сигнала. Количественно маскировка оценивается числом децибел, показывающим, насколько повышается порог слышимости данного тона в присутствии другого по сравнению с его восприятием в тишине. Маскировка зависит от разности уровней и соотношения частот данного (маскируемого) звука и мешающего (маскирующего). Многочисленные опыты показали, что тон любой частоты сильнее маскируется более низкими тонами, чем более высокими. Установлено, что наиболее информативный диагностический сигнал, исходящий от двигателя автомобиля, лежит в диапазоне частот 0,1...4,5 кГц, сигнал помех наибольшей силы – в диапазоне частот 0,01...1,0 кГц. В результате более слабый полезный акустический сигнал может оказаться совершенно неслышимым в присутствии другого, более громкого.

Программно-аппаратные средства предоставляют в распоряжение диагноста возможности параметрического измерения спектральной мощности акустических сигналов. В самом общем виде понятие спектра включает спектр амплитуд, под которым понимаются амплитуды гармонических составляющих и спектр фаз. Для спектрального анализа поток акустических сигналов можно представить в графическом трехмерном виде. К примеру, по оси X расположить частотную характеристику, по оси Y – шкалу амплитуд, по оси Z – время. График станет более наглядным, если использовать функцию цветовой окраски сигналов различных частот в зависимости от их амплитуд.

К примеру, для проверки исправности автомобильного стартера автомобиля «Volkswagen Golf» выпуска 1991 года (двигатель мод. 4/1700(w) объемом 1,7 л) мы записали и проверили равномерность во времени излучаемой стартером акустической энергии в частотных диапазонах: 1000...2500 и 3500...4500 Гц (рис. 2).

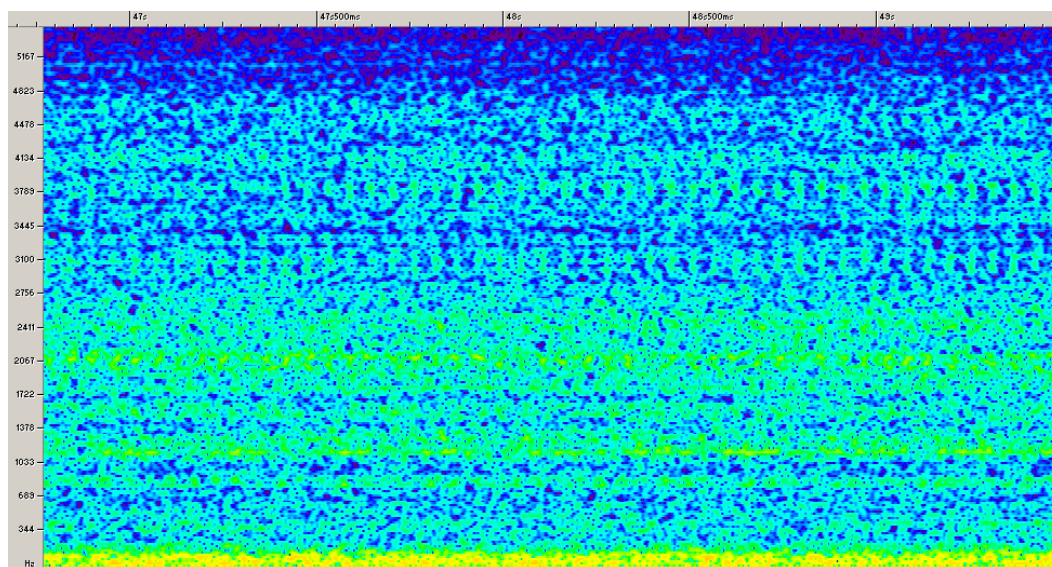


Рис. 2. Спектрограмма звука исправного стартера автомобиля

Равномерный акустический поток свидетельствует об отсутствии перерывов в работе электрических цепей стартера. На частотах 700, 3100 и 3800 Гц хорошо просматриваются амплитудные всплески. Период между всплесками составляет 55 мс, что соответствует половине оборота коленчатого вала двигателя при частоте вращения 540 мин⁻¹. По однообразию и равномерности всплесков, связанных с завершением такта сжатия в одном из цилиндров, можно уверенно судить о «ровной» работе стартера. В данном примере для записи звука использовался микрофон «FIRST FA-3060» (чувствительность: -7дБ + 3дБ/1кГц). Запись производилась с расстояния 150 мм. Обработка звука осуществлялась программой «Stainberg WaveLab v6.1».

Спектральный, частотно-временной анализ позволяет сопоставлять отдельные частотные составляющие сигнала с различными временными периодами работы двигателя, обнаруживая тем самым скры-

тые закономерности в изменении исследуемых процессов, определяя степень влияния одного процесса на другой, решая, таким образом, часть прогнозно-диагностических задач [2].

Нами также были записаны акустические сигналы форсунок дизельного двигателя автомобиля «Chrysler Voyager» выпуска 2001 г. (двигатель мод. 2,5D Turbo, 425 CLIEE (36B) объемом 2,5 л). При последующем частотно-временном анализе, зная порядок работы цилиндров (1-3-4-2), мы определили меньший вклад 3-го цилиндра в общую работу двигателя (рис. 3 и 4).

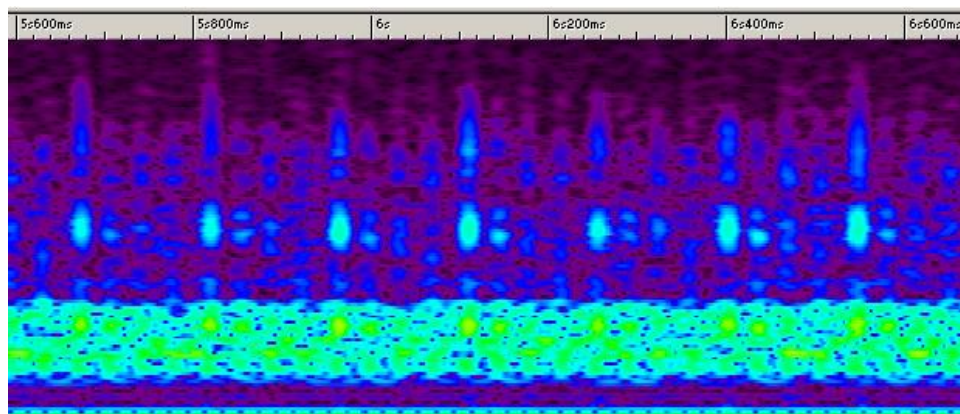


Рис. 3. Спектрограмма звука форсунки 2-го цилиндра

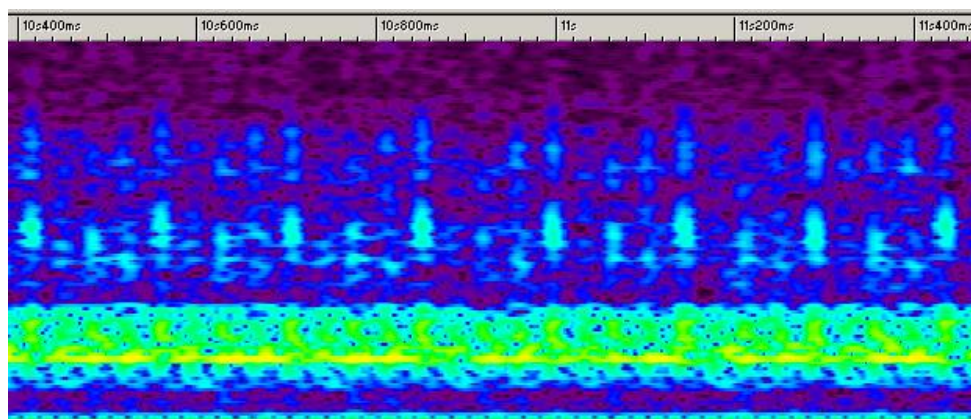


Рис. 4. Спектрограмма звука форсунки 4-го цилиндра

Запись производилась с использованием виброакустического щупа и портативного магнитофона «Olympus PearlCorder S713» с последующей оцифровкой в формат PCM, атрибутами 44,1 кГц, 16 бит, моно, 86 кБ/с (тип файла: Звук WAVE). Последующая обработка производилась программой «Stainberg WaveLab v6.1». Кроме программы «Stainberg WaveLab v6.1» нами использовалась программа «GoldWave 5.55».

Помимо возможной оцифровки и точного измерения характеристик сигнала, достоинством виброакустического диагностирования с использованием ПАС в сравнении с обычным прослушиванием является возможность долгого хранения и быстрого извлечения ранее записанной диагностической информации, что позволяет осуществлять индивидуальный виброакустический мониторинг каждого конкретного автомобиля на всем протяжении его эксплуатации. Сравнивая записи, сделанные в различные периоды эксплуатации данного автомобиля, можно наиболее точно выявить моменты изменения акустического фона, зафиксировать появление новых, либо изменение силы и вида ранее зафиксированных сигналов. Данная возможность повышает достоверность виброакустического метода при определении, а также прогнозировании развития дефектов.

В последнее время в связи с усложнением конструкции автомобилей все более широкое распространение получают средства интеллектуальной поддержки диагноста – экспертные системы. Использование экспертных систем в диагностировании автомобилей облегчает труд диагноста. Их применение в составе виброакустического метода позволяет быстрее обрабатывать большие объемы информации, уменьшая при этом число субъективных ошибок. Роль и место современной экспертной системы в

виброакустическом методе возможно определить изучая закономерности, связывающие субъективно воспринимаемые «на слух» и объективно отображаемые виброакустические сигналы с другими физическими параметрами и общим состоянием автомобиля [3]. Именно на этом пути – формализации трудно вербализуемых (интуитивных или нечетких для самого эксперта) представлений – можно предполагать прорыв к принципиально новому классу систем диагностирования. Возможными путями в этом направлении представляются следующие:

- учет в базе знаний, насколько это возможно, интуитивных представлений специалиста, например, проявляющихся в форме ассоциаций;
- отображение в формализмах базы знаний уверенности эксперта в информации (знаниях) или, другими словами, учет степени неуверенности в сообщаемых представлениях;
- отражение на входе системы того, что можно характеризовать термином «сомнения» в пропущенных через мозг специалиста объективных признаках и/или субъективных сведениях.

Новые экспертные системы, основанные на теории нечетких множеств, позволяют учитывать более сложные взаимосвязи признаков, которые в явной или неявной субъективной форме принимают во внимание профессионалы в процессе принятия диагностических (прогностических) решений.

Заключение. В настоящее время благодаря внедрению передовых технологий сбора и анализа информации теория диагностирования получает новый позитивный импульс развития. Исследование возможностей современных компьютерных средств преобразования и обработки виброакустических сигналов позволяет повысить достоверность и содержательность виброакустического метода. Компьютерные средства сбора и анализа информации, а также экспертные системы, создаваемые на их основе, позволяют расширить степень практической применимости виброакустического метода применительно к диагностированию автомобилей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов, Б.В. Акустическая диагностика механизмов / Б.В. Павлов. – М.: Машиностроение, 1971. – 223 с.
2. Вибрации в технике: справочник: в 6-ти т. / ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 5: Измерения и испытания; под ред. М.Д. Генкина. – 496 с.
3. Тарасик, В.П. Технологии искусственного интеллекта в диагностировании автотранспортных средств: моногр. / В.П. Тарасик, С.А. Рынкевич. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2007. – 280 с.

Поступила 20.06.2011

COMPUTER TECHNOLOGY IN VIBROACOUSTIC DIAGNOSTIC OF VEHICLES

H. UVAROV

Some new approaches to improving the method of vibroacoustic diagnostic of vehicles by using modern computer tools. The examples of practical applications of signal processing. It is proposed to vibroacoustic diagnostic more widely used expert systems based on fuzzy logic. New expert systems allow for the subtle and complex relationship of classification features that are explicitly or implicitly subjective form take into account the professionals in making diagnostic (prognostic) solutions, as well as enhance the degree of practical applicability of the method applied to vibroacoustic diagnostics of vehicles. The most promising is the way to create a combined "ergstatic expert systems", in which the expert and the software and hardware mutually complement each other nyayut.