

**Тыманюк К. С.,  
Костенко В. Л.,  
Николенко А. А.,  
Теплечук А. М.,  
Адаменко Д. О.**

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭКСПРЕСС- ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА**

*В работе предложена методика экспресс-диагностики двигателя внутреннего сгорания на основе вейвлет-анализа вибрационных сигналов в процессе технического обслуживания с использованием автоматизированной системы параллельного сбора данных. В среде MATLAB разработано программное обеспечение для обработки и анализа диагностических данных. Проведена экспериментальная апробация разработанной методики. Анализ экспериментальных данных позволил определить дефектные двигатели при помощи вибрационного сигнала. Результаты исследований могут быть полезны для оценки технического состояния двигателей.*

**Ключевые слова:** экспресс-диагностика, вибрационные сигналы, вейвлет-анализ, автоматизированная система, среда MATLAB, двигатель внутреннего сгорания.

### **1. Введение**

Экспресс-диагностика состояния двигателя внутреннего сгорания (ДВС) является важной составляющей производства и технического сервиса. Она позволяет решать актуальные задачи ресурсосбережения при анализе параметров его функционирования.

Существующие методы диагностики ДВС [1] обладают достаточной информативностью, что позволяет выявить неисправность в диагностируемой системе ДВС, однако их недостатком является высокая трудоемкость и специализированность, что в случае первичного контроля с целью поиска наличия отклонений от нормы является существенным. Для решения задач первичной экспресс-диагностики с целью определить отклонение от нормального функционирования механизмов ДВС возможно использовать вибрационный метод диагностики. Вибрационные методы диагностики механизмов двигателя внутреннего сгорания (ДВС) [2–4] обладают таким недостатком, как сложность определения и идентификации диагностических признаков в комплексных технических системах. Однако для целей экспресс-диагностики, когда требуется проверить отклонение от нормы, нет необходимости в идентификации и локализации дефекта. Устанавливается только факт отклонения от нормы, как и в случае контроля по альтернативному признаку [5].

Решением может служить метод вибродиагностики, позволяющий сравнивать вибрационный сигнал исправного двигателя, выступающий в роли эталона с вибрационным сигналом контролируемого ДВС этого же типа.

Исходя из изложенного дальнейшее развитие методов экспресс-диагностики ДВС является актуальным.

### **2. Объект исследования и его технологический аудит**

Объектом исследования является экспресс-диагностика ДВС на основе вейвлет-анализа. К основным возмож-

ностям экспресс-диагностики с использованием вибрационных сигналов ДВС относится возможность проводить диагностирование механизмов без необходимости разборки, что позволяет существенно сократить время процедуры диагностирования. Диагностика по вибрационным параметрам является одним из эффективных методов неразрушающего контроля технического состояния механизмов. Применение вейвлет-анализа позволит в перспективе развития экспресс-диагностики с применением вибрационных сигналов ДВС повысить достоверность результатов по сравнению с распространенными методами анализа, такими как анализ спектра сигнала.

Основными недостатками экспресс-диагностики по вибрационным параметрам ДВС является необходимость накопления базы данных эталонных частотных портретов ДВС с применением сети датчиков. Такая информация должна записываться синхронно для всех используемых измерительных каналов, что требует в свою очередь использование системы, обеспечивающей параллельный сбор данных. Также к недостаткам можно отнести сложность сравнения и интерпретации результатов.

Решением данных недостатков может служить разработка автоматизированной измерительной системы, которая позволит накапливать диагностическую информацию для различных этапов эксплуатационного цикла ДВС, а также разработку и совершенствование специализированного программного обеспечения, которое позволит анализировать получаемую диагностическую информацию и обеспечивать ее компактное хранение.

### **3. Цель и задачи исследования**

Целью данных исследований является обеспечение функциональных возможностей экспресс-диагностики ДВС с применением вибрационных сигналов.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Составить базу данных эталонных частотных портретов ДВС с применением вейвлет-анализа вибрационных сигналов. Использование вейвлет-преобразования

благодаря помехоустойчивости и эффективности алгоритмов является мощным инструментом для цифровой обработки сигналов при построении информационно-измерительных систем (ИИС) диагностики.

2. Разработать структурную схему автоматизированной системы для экспресс-диагностики.

3. Разработать программное обеспечение с применением среды MATLAB для анализа диагностических сигналов, циклов работы ДВС в исправном и неисправном состоянии.

4. Провести экспериментальное подтверждение достоверности разработанной методики.

#### 4. Анализ литературных данных

Авторы работ, посвященных диагностике ДВС, рассматривают вибрационные методы как отдельную группу для диагностики технического состояния механизмов. В работе [6] рассмотрен вибрационный метод как позволяющий ускоренно оценивать техническое состояние элементов двигателя. Существующие исследования методов распознавания технического состояния в работах, посвященных проблемам диагностики механизмов по вибрационным параметрам с использованием традиционных методов [7], рассматривают анализ спектра сигнала вибрации механизмов ДВС, который позволяет выявить частотный состав сигнала. Однако данный метод мало информативен из-за большой номенклатуры существующих ДВС, механизмы которых отличаются по конструкции и массе, что приводит к сложности определения дефектов из-за разных частотных портретов. В работе [8] использован анализ кепстра вибрационного сигнала ДВС как более чувствительный метод к определению механических дефектов, чем анализ спектра, так как составляющие сигнала, представляющие интерес для целей диагностики трудно выделить иными способами. Данные исследования позволили выбрать чувствительную составляющую сигнала к эксплуатационным параметрам цилиндропоршневой группы (ЦПГ). Однако для широкого применения данный метод требует использование баз данных сигнатур сигналов для каждого типа двигателя на разных стадиях его эксплуатационного цикла.

В работе [9] для вибрационного сигнала дизельного ДВС использован вейвлет-анализ одноканального сигнала, описано сочетание методов позволяющих решить проблему разложения широкополосного сигнала на компоненты для определения отклонений процесса сгорания и дефектов механизмов. В работе [10] описано применение вейвлетов для диагностики явления детонации, с использованием сигнала вибрации и колебаний давления в цилиндрах ДВС с применением нейронной сети для распознавания образов состояния функционирования ДВС.

Для целей экспресс-диагностики решением может служить запись вибрационных сигналов исправного двигателя заданной модели для дальнейшего применения при определении отклонения от нормы с использованием данных сигналов и полученных для сравнения. Применение вейвлетов к анализу виброакустического сигнала существенно расширит возможности экспресс-диагностики и позволит накопить базу данных для возможности идентификации неисправностей систем ДВС в будущем.

Таким образом, возможна реализация методики с ограниченными возможностями на начальном этапе накопления данных, однако достаточной для целей регистрации факта отклонения от нормы.

#### 5. Материалы и методы исследования

На первом этапе для каждого типа двигателя составляется база данных на основе вейвлет-анализа вибрационных сигналов в следующей последовательности:

1. Этап сбора базы данных сигналов с исправного двигателя с известной степенью износа с применением вейвлет-анализа.

2. Внесение в системы двигателя контролируемых обратимых неисправностей. Для современных ДВС, оснащенных ECU с OBD диагностическим разъемом, есть возможность частичной симуляции неисправностей программным методом [11]. Это позволит исследовать вибрационный сигнал с целью поиска и накопления диагностических признаков.

3. Экспресс-диагностика ДВС при наличии исходного сигнала исправного двигателя данного типа, с целью определения отклонения от нормы работы его систем.

Следует отметить, что достоверность методов вибродиагностики существенно зависит от топологии расположения датчиков. По этому при калибровке и непосредственно при экспресс-диагностике топология датчиков должна оставаться неизменной и соответствовать ISO 13373-1:2002. Закрепление измерительных вибрационных датчиков выполняется согласно требованиям стандарта, подробно требования к расположению датчиков и контрольные точки измерений рассмотрены авторами в работе [12]. Контрольные точки измерений фиксируются в протоколе проведения диагностики, для возможности корректного сравнения данных при повторной диагностике.

Для обработки виброакустических данных экспресс-диагностики ДВС в рамках данной работы использованы вейвлеты Добеши, обладающие свойством сглаженного представления сигнала с выявлением его локальных особенностей, что дает возможность анализа его характерных свойств.

Использование вейвлет-преобразования позволяет очистить исходный сигнал от шумов и случайных составляющих, которые затрудняют его дальнейшую обработку.

Многоуровневое одномерное вейвлет-разложение сигнала в среде MATLAB осуществляется при помощи функции *wavedec*, которая выполняет вейвлет разложение сигнала  $s$  до уровня  $N$ , вычисляя аппроксимирующие коэффициенты  $cA_N$  и детализирующие  $cD_N$ . Эти векторы образуются сверткой сигнала  $s$  с фильтром нижних частот  $Lo\_D$  для аппроксимации, с фильтром высоких частот  $Hi\_D$  для детализации, после чего выполняется двоичная децимация. На следующем этапе раскладываются коэффициенты аппроксимации  $cA_1$  на две части по аналогичной схеме с заменой  $s$  на  $cA_1$ . Вейвлет-разложение сигнала  $s$ , выполненное до уровня  $N$ , представляет собой вектор вида:  $[cA_N, cD_N, \dots, cD_1]$ .

Для целей обработки виброакустических сигналов в среде MATLAB, каждого из измерительных каналов, сигналы с которых поступают в виде цифрового аудио-файла формата WAVE audio, сформирована программа, алгоритм которой приведен на рис. 1. Она позволяет сравнивать частотные портреты диагностируемого ДВС.

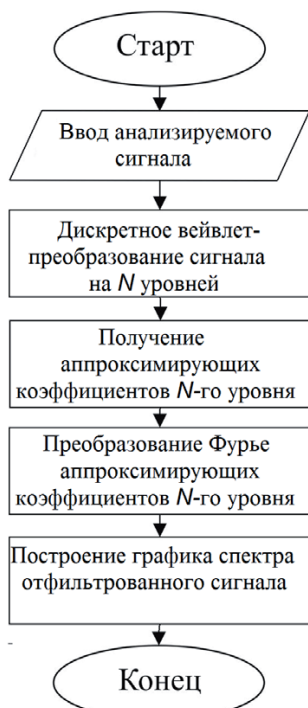


Рис. 1. Алгоритм работы ПО для сравнения частотных портретов ДВС

Программа работает следующим образом:

Считывает файл WAVE формата с именем «file.wav» и возвращает полученные данные в массив «z». Далее выполняется процедура многоуровневого дискретного разложения данных, заданных вектором «z», по базису вейвлет-функции «db4». В данном случае это вейвлет Добеши. После чего программа получает аппроксимирующие коэффициенты вейвлет-представления сигналов. Это заключается в разбивке сигнала на две составляющие — грубую (аппроксимирующую) и детализирующую с последующим их уточнением итерационным методом. Следующим этапом выполняется прямое преобразование Фурье аппроксимирующей составляющей сигнала для получения спектра сигнала, после чего выполняется построение графика спектра отфильтрованного низкочастотного сигнала.

Для целей хранения полученных исходных сигналов использована программная библиотека для сжатия данных zlib, позволяющая сжимать бинарные данные без потерь, что является важным условием для дальнейшего изучения диагностических сигналов. Сокращение объема хранимой информации составляет в среднем 30%.

Для получения экспериментальных данных измерений разработана восьмиканальная система параллельного сбора данных с комплектом аналогово-цифровых преобразователей, частотой дискретизации 70000 Гц и возможностью синхронной записи сигнала с датчиков вибрации, системы зажигания, датчика импульсов работы первого цилиндра, а также напряжения бортовой сети. Структура системы представлена на рис. 2. Особенность данной системы заключается в наличии блока цифровой обработки вибросигналов с помощью одноплатного компьютера типа Raspberry Pi и устройства отображения информации.

Также система сбора данных содержит согласующее устройство, входное напряжение которого находится в диапазоне  $\pm 10$  В, и 12 разрядный АЦП.

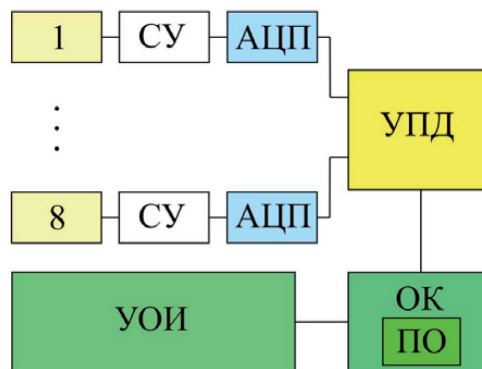


Рис. 2. Система сбора данных: 1–8 — датчики; СУ — согласующее устройство; АЦП — аналого-цифровые преобразователи; УПД — устройство передачи данных; ОК — одноплатный компьютер; ПО — программное обеспечение; УОИ — устройство отображения информации

Общий вид экспериментальной установки и автомобиля с диагностируемым ДВС представлен на рис. 3.



Рис. 3. Экспериментальная установка и диагностируемое транспортное средство

В данной системе использованы вибрационные датчики пьезоэлектрического типа серии АВС с параметрами собственной частоты и механической прочностью, обеспечивающими требуемые диапазоны измерений. В частности, это датчик широкополосной вибрации АВС-134-05, низкочастотный АНС 114 и ультразвуковые датчики АВС 117, сигналы с которых наиболее чувствительны к ударным, носящим импульсный характер, воздействиям, возникающим в процессе работы клапанов газораспределительного механизма. Получение необходимого сигнала осуществляется путем крепления датчиков к соответствующим точкам ДВС. С целью исключения влияния неисправностей систем, обеспечивающих работу двигателя, на анализ и выделение информации из вибрационных сигналов на первом этапе накопления диагностических признаков, диагностические сигналы синхронно записаны с сигналами работы системы зажигания, напряжения бортовой сети, которые служат в качестве опорных данных.

## 6. Результаты исследования

В качестве примера диагностики методом сравнения сигналов с эталонными из БД в рамках данной работы, авторами статьи был записан сигнал четырехтактных рядных двигателей автомобилей семейства ВАЗ. В первом случае записан сигнал нормального состояния

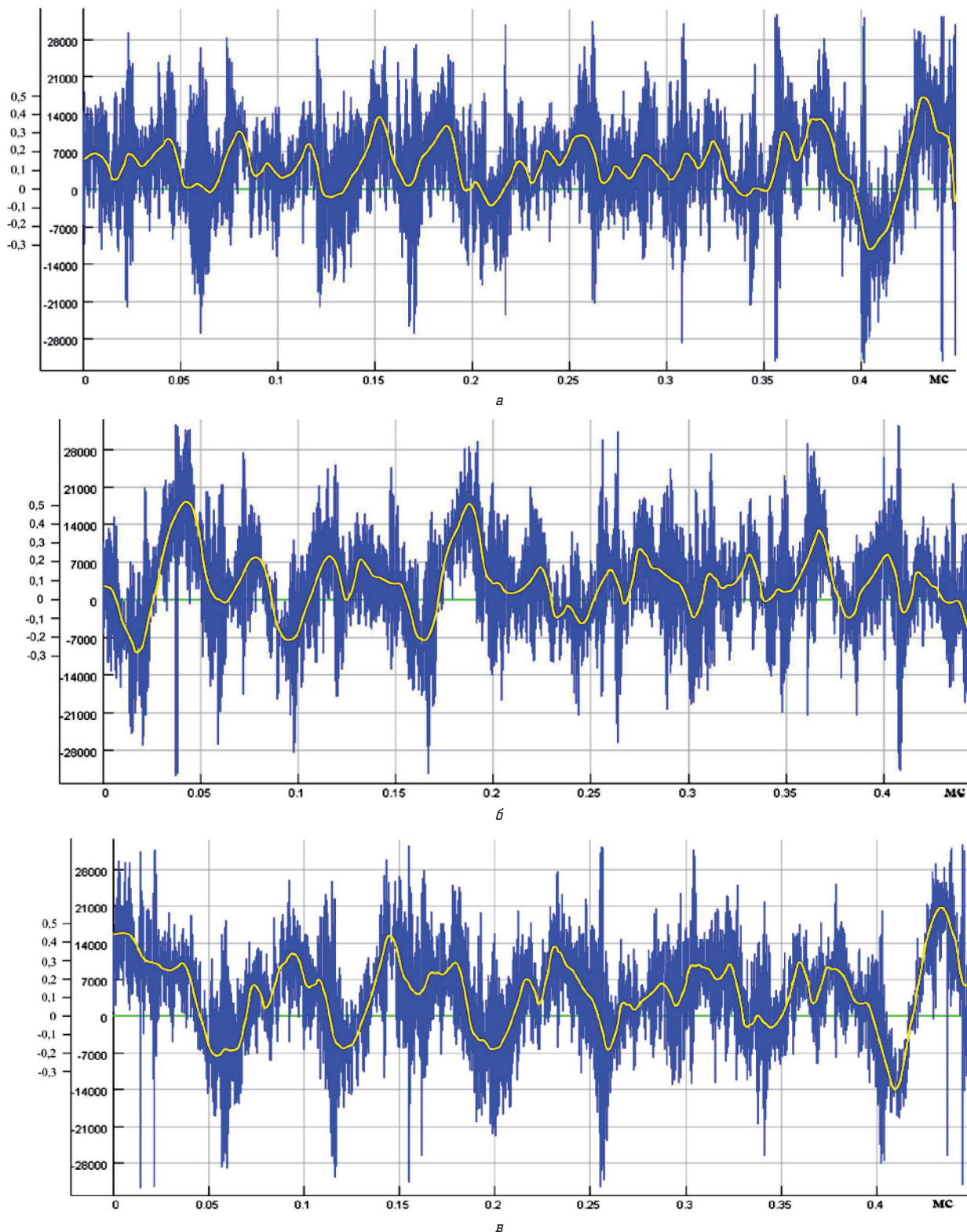


работы двигателя. В других двух случаях сигналы с имитацией неисправности работы системы зажигания, выполненной при помощи отключения высоковольтного провода от одного из цилиндров ДВС.

На рис. 4 приведены результаты трех измерений исходных широкополосных сигналов трех последовательных циклов, выделенных из общего потока диаг-

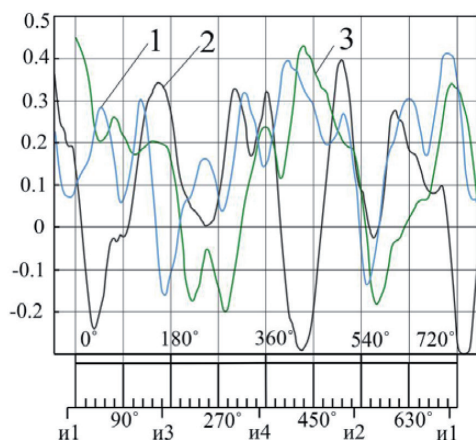
ностических данных. Также для сигналов на рис. 5 приведена аппроксимирующая кривая, полученная при помощи 9-ти уровневой одномерной вейвлет-декомпозиции с использованием вейвлета Добеши «db4».

Основываясь на данных рис. 5, видно, что анализ оригинального сигнала затруднен наличием шумовой составляющей.



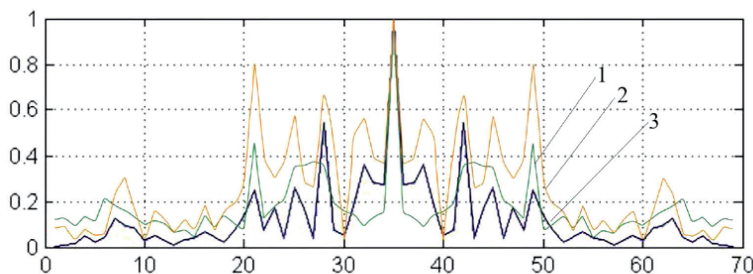
**Рис. 4.** Исходные широкополосные вибрационные сигналы трех циклов работы ДВС: *а* — исправное состояние; *б* — отсутствие зажигания во втором цилиндре; *в* — отсутствие зажигания в четвертом цилиндре

На рис. 5 приведены отфильтрованные низкочастотные сигналы одного цикла работы трех ДВС при помощи вейвлет-декомпозиции с использованием вейвлета Добеши «db4» для измеренного широкополосного вибрационного сигнала с целью выделения низких частот. Сигналы показаны с привязкой к углу поворота коленчатого вала, также показан момент искрообразования «и» с указанием номера цилиндра, последовательность работы цилиндров соответственно 1-3-4-2.



**Рис. 5.** Отфильтрованный НЧ сигнал: 1 — исправное состояние ДВС; 2 — отсутствует зажигание во втором цилиндре; 3 — отсутствует зажигание в четвертом цилиндре

На рис. 6 приведен результат обработки сигналов вибрации блоков ДВС с помощью программы сравнения спектров частот ДВС.



**Рис. 6.** Спектр отфильтрованного сигнала: 1 — исправное состояние ДВС; 2 — отсутствует зажигание во втором цилиндре; 3 — отсутствует зажигание в четвертом цилиндре

В результате сравнения отфильтрованной низкочастотной составляющей после вейвлет-декомпозиции (рис. 5, 6) видно изменение амплитуды низкочастотных колебаний, причиной которых является неисправность системы зажигания. Изменение амплитуды и частоты низкочастотной составляющей относительно эталонной в данном случае указывает на возникшую неравномерность вращения коленчатого вала ДВС.

Таким образом, используя разработанную методику можно проводить экспресс-диагностику ДВС применяя ранее накопленную информацию из БД.

## 7. SWOT-анализ результатов исследований

Разработанная методика экспресс-диагностики ДВС на основе вейвлет-анализа вибрационных сигналов обеспечивает корректное получение данных о состоянии

работы ДВС, предложенная ИИС обеспечивает возможность сравнения полученных данных при повторной диагностике с целью отслеживания изменения технического состояния ДВС в процессе эксплуатации. Также к достоинствам можно отнести автоматизацию процесса экспресс-диагностики.

К недостаткам на данном этапе исследований можно отнести необходимость накопления диагностической информации по каждому типу неисправности, такая информация в последствии позволит сократить время проведения процедуры экспресс-диагностики и расширить ее возможности. Кроме того существует необходимость расширения номенклатуры типов диагностируемых ДВС.

Для обработки вибрационных данных очень важным является подбор методов анализа сигнала, выбор способа фильтрации и сжатия сигнала. Анализ с целью выделения информационных признаков изменения технического состояния является важным этапом для создания программного обеспечения ИИС диагностики технического состояния ДВС.

Таким образом, для целей создания универсального экспресс-метода вибродиагностики необходимо накопление, распознавание и классификация дефектов.

## 8. Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Составлена база данных вибрационных сигналов исправного двигателя семейства ВАЗ, для чего были записаны синхронные сигналы вибрационных датчиков, расположенных в характерных точках на блоке цилиндров ДВС, а также на головке блока цилиндров. Для возможности привязки вибрационных сигналов к углу поворота коленчатого вала использован датчик ВМТ первого цилиндра.

2. Разработана структура автоматизированной измерительной системы для экспресс-диагностики, обеспечивающей параллельное получение диагностических сигналов с вибрационных датчиков. Применение одноплатного компьютера в качестве устройства записи диагностических данных позволило улучшить эргономику информационно измерительной системы.

3. Разработано программное обеспечение для анализа вибрационных диагностических сигналов, которое позволяет сравнивать вибрационные сигналы ДВС с использованием вейвлет-преобразования, сохранять полученные сигналы в БД для дальнейшего использования. Применение открытой библиотеки сжатия данных zlib, обеспечило сокращение объема хранимой информации в среднем на 30 %.

4. Сравнительный анализ вейвлет-декомпозиций вибрационных сигналов неисправных ДВС с имеющимися в БД показал возможность дальнейшего применения полученных данных для распознавания неисправностей ДВС в будущем. По мере накопления диагностических признаков, возможности методики будут существенно расширены. На данном этапе возможно применение методики для экспресс-диагностики отклонения функционирования двигателя от нормального состояния. Однако для идентификации неисправности требуется использование дополнительных методов углубленной диагностики.

## Литература

1. Тыманюк, К. С. Разработка автоматизированной системы итеративного контроля технического состояния систем двигателя автомобиля [Текст] / К. С. Тыманюк, В. Л. Костенко // Технологический аудит и резервы производства. — 2016. — № 1/2(27). — С. 77–82. doi:10.15587/2312-8372.2016.59871
2. Zbigniew, S. Application of vibration signals in the diagnosis of combustion engines – exploitation practices [Text] / S. Zbigniew, J. Warczek // Journal of KONES. Powertrain and Transport. — 2011. — Vol. 18, № 3. — P. 405–412.
3. Гассельберг, В. С. Диагностика двигателей внутреннего сгорания автомобилей по виброакустическим параметрам [Текст] / В. С. Гассельберг, А. В. Запорожец // Вестник АГТУ. — 2007. — № 2. — С. 72–74.
4. Komorska, I. The diagnostic model proposition of the engine vibration signal [Text] / I. Komorska // Journal of KONES. Powertrain and Transport. — 2008. — Vol. 15, № 2. — P. 191–198.
5. Рубльов, В. І. Методологія оцінки якості сільськогосподарської техніки при технічному сервісі [Текст] / В. І. Рубльов, В. Д. Войтюк // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. — 2010. — Вип. 144, Ч. 1. — С. 259–268.
6. Оксень, Е. И. Использование виброакустических сигналов для оценки состояния двигателя внутреннего сгорания [Текст] / Е. И. Оксень, Д. Е. Оксень // Авиационно-космическая техника и технология. — 2011. — № 9. — С. 142–147.
7. Tomaszewski, F. Frequency Analysis of Vibrations of the Internal Combustion Engine Components in the Diagnosis of Engine Processes [Text] / F. Tomaszewski, G. Szymański // Archives of Transport. — 2012. — Vol. 24, № 1. — P. 117–125. doi:10.2478/v10174-012-0008-2
8. Czech, P. Vibration diagnosis of car motor engines [Text] / P. Czech, B. Lazarz, H. Madej, G. Wojnar // Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering. — 2010. — Vol. 1, № 3. — P. 37–42.
9. Du, X. Source separation of diesel engine vibration based on the empirical mode decomposition and independent component analysis [Text] / X. Du, Z. Li, F. Bi, J. Zhang, X. Wang, K. Shao // Chinese Journal of Mechanical Engineering. — 2012. — Vol. 25, № 3. — P. 557–563. doi:10.3901/cjme.2012.03.557
10. Radoi, A. Wavelet analysis to detect the knock on internal combustion engines [Text] / A. Radoi, V. Lazarescu, A. Florescu // Roum. Sci. Techn. – Electrotechn. et Energ. — 2009. — Vol. 54, № 3. — P. 301–310.
11. Banlaki, P. Part failure diagnosis for internal combustion engine using noise and vibration analysis [Text] / P. Banlaki, Z. Magosi // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. — 2010. — Vol. 38, № 1. — P. 53–60. doi:10.3311/pp.tr.2010-1.09
12. Тыманюк, К. С. Методика диагностики транспортного средства по параметрам вибрации, напряжения бортовой сети и системы зажигания [Текст] / К. С. Тыманюк, В. Л. Костенко, Е. Д. Поперека // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Механико-технологические системы и комплексы. — 2015. — № 52(1161). — С. 44–51.

## РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ЕКСПРЕС-ДІАГНОСТИКИ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ

В роботі запропонована методика експрес-діагностики двигуна внутрішнього згоряння на основі вейвлет-аналізу вібраційних сигналів в процесі технічного обслуговування з використанням автоматизованої системи паралельного збору даних. У середовищі MATLAB розроблено програмне забезпечення для обробки та аналізу діагностичних даних. Проведена експериментальна апробація розробленої методики. Аналіз експериментальних даних дозволив визначити дефектні двигуни за допомогою вібраційного сигналу. Результати досліджень можуть бути корисні для оцінки технічного стану двигунів.

**Ключові слова:** експрес-діагностика, вібраційні сигнали, вейвлет-аналіз, автоматизована система, середа MATLAB, двигун внутрішнього згоряння.

*Тыманюк Константин Сергеевич, аспирант, кафедра металлорежущих станков, метрологии и сертификации, Одесский национальный политехнический университет, Украина, e-mail: kstymaniuk@gmail.com.*

*Костенко Виталий Леонидович, доктор технических наук, профессор, кафедра металлорежущих станков, метрологии и сертификации, Одесский национальный политехнический университет, Украина.*

*Николенко Анатолий Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра информационных систем, Одесский национальный политехнический университет, Украина.*

*Теплечук Анатолий Михайлович, старший преподаватель, кафедра автомобильного транспорта, Одесский национальный политехнический университет, Украина.*

*Адаменко Денис Олегович, кафедра информационных систем, Одесский национальный политехнический университет, Украина.*

*Тыманюк Костянтин Сергійович, аспірант, кафедра металорізальних верстатів, метрології та сертифікації, Одеський національний політехнічний університет, Україна.*

*Костенко Віталій Леонідович, доктор технічних наук, професор, кафедра металорізальних верстатів, метрології та сертифікації, Одеський національний політехнічний університет, Україна.*

*Ніколенко Анатолій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра інформаційних систем, Одеський національний політехнічний університет, Україна.*

*Теплечук Анатолій Михайлович, старший викладач, кафедра автомобільного транспорту, Одеський національний політехнічний університет, Україна.*

*Адаменко Денис Олегович, кафедра інформаційних систем, Одеський національний політехнічний університет, Україна.*

*Tymaniuk Konstantin, Odessa National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: kstymaniuk@gmail.com.*

*Kostenko Vitaliy, Odessa National Polytechnic University, Ukraine.*

*Nikolenko Anatolii, Odessa National Polytechnic University, Ukraine.*

*Teplechuk Anatolii, Odessa National Polytechnic University, Ukraine.*

*Adamenko Denys, Odessa National Polytechnic University, Ukraine.*