

Анализ мгновенной угловой скорости коленчатого вала дизеля



М. Н. Панченко,
ст. преподаватель ФГБОУ
ВО «Петербургский государ-
ственный университет пу-
тей сообщения Императора
Александра I» (ПГУПС)



В. В. Грачев,
к. т. н., доцент,
ПГУПС



А. В. Грищенко,
д. т. н.,
профессор, ПГУПС

С помощью аппарата вейвлет-преобразования можно существенно повысить достоверность контроля технического состояния многоцилиндрового дизеля по изменению мгновенной угловой скорости коленчатого вала и выявить неисправный цилиндр без привлечения дорогой аппаратуры.

Оценка качества рабочего процесса в цилиндрах многоцилиндрового транспортного дизеля по изменению мгновенной частоты вращения коленчатого вала (КВ) по-прежнему актуальна, так как дает возможность повысить параметрическую надежность не только двигателя, но и транспортного средства без использования дорогостоящих аппаратных средств контроля параметров рабочего процесса отдельных цилиндров [1]. Дополнительное преимущество сигнала мгновенной угловой

скорости — его относительно невысокая (по сравнению, например, с виброакустическими сигналами) зашумленность [2].

Периодический характер изменения угловой скорости определил в качестве основного инструмента для ее анализа преобразование Фурье, связывающее временной сигнал с его представлением в частотной области. Так, в [3] теоретически обосновывается и экспериментально подтверждается возможность оценки индикаторного момента и угла опережения зажигания отдельных цилиндров по параметрам амплитудного спектра кривой мгновенной скорости КВ бензинового двигателя 4С9,2/9,2.

В работе [4] предложен метод определения неисправности четырех- и шестицилиндровых бензиновых и дизельных двигателей по фазовой диаграмме спектра частоты вращения КВ, которая строится по фазовому спектру сигнала в полярных координатах. Анализ углового положения фазовых векторов отдельных гармоник спектра позволяет не только выявить отклонения в работе цилиндров, но и локализовать неисправный цилиндр.

Влияние неисправности ближайшего к датчику частоты вращения КВ цилиндра четырехтактного 12-цилиндрового V-образного дизельного двигателя на значения амплитуд спектра частоты вращения КВ исследовано в работе [5]. При этом влияние неисправности остальных цилиндров на амплитудный спектр не рассматривалось.

Расширение функциональных возможностей диагностической экспертной системы двигателя за счет использования спектра угловой скорости и ускорения КВ описано в [6, 7]. По параметрам спектра определяют степень неравномерности работы цилиндров, их герметичность и степень неуравновешенности двигателя. Однако конкретные взаимосвязи не приводятся.

В [2] установлена взаимосвязь между режимом работы (нагрузкой) и амплиту-

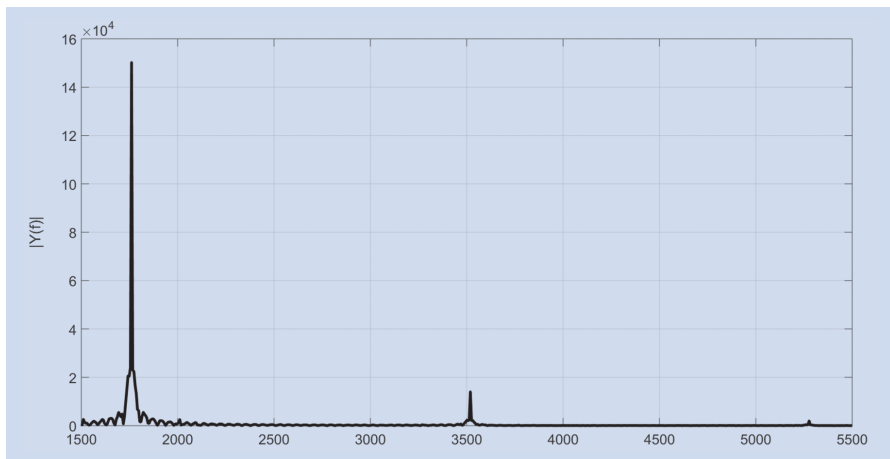


Рис. 1. Спектр частоты вращения коленчатого вала при исправном двигателе

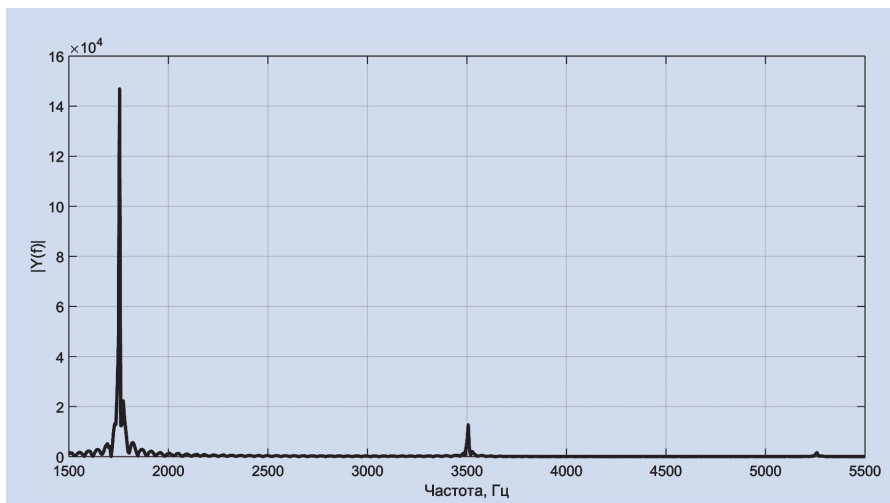


Рис. 2. Спектр частоты вращения коленчатого вала при отключенном 5-м правом цилиндре двигателя

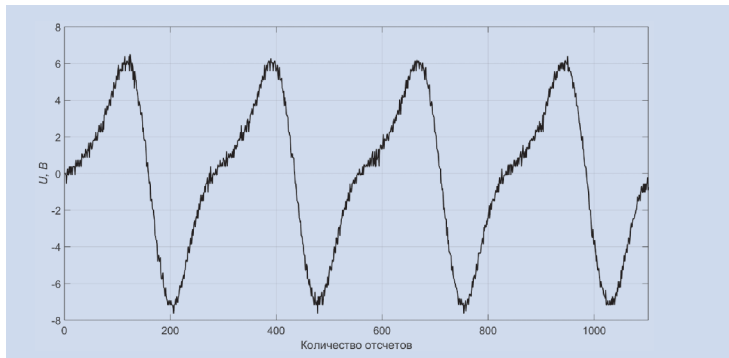


Рис. 3. Выходное напряжение импульсного датчика частоты вращения коленчатого вала

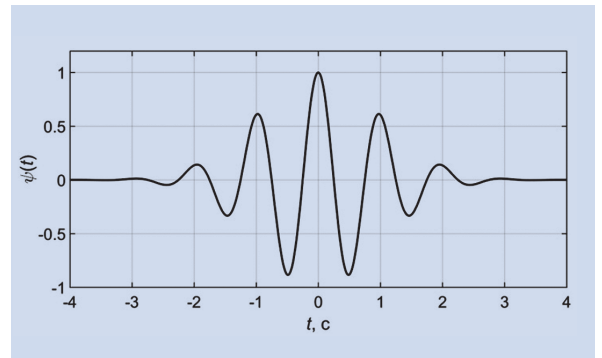


Рис. 4. Представление вейвлета Морле во временной области

дой второй гармоники спектра мгновенной скорости КВ дизельного двигателя 4С8,8/10. Вместе с тем результаты выполненных экспериментальных исследований свидетельствуют о невозможности достоверной локализации отказов топливной аппаратуры и газораспределительного механизма двигателя по параметрам спектра.

Таким образом, даже для двигателей с малым числом цилиндров возникают сложности в определении взаимосвязи между параметрами спектра мгновенной угловой скорости КВ и техническим состоянием узлов двигателя. Локализация таким способом отказов многоцилиндровых двигателей представляет собой существенно более сложную задачу. Это связано с большим значением момента инерции вращающихся узлов и малым периодом действия отдельного цилиндра внутри одного рабочего цикла двигателя. Амплитудные спектры кривой напряжения датчика мгновенной угловой скорости КВ тепловозного дизельного двигателя 16СН26/26 для частоты вращения коленчатого вала $n = 845$ об/мин представлены для случаев исправного двигателя (рис. 1) и отключенного 5-го правого цилиндра (рис. 2).

Видно, что даже полное прекращение рабочего процесса в одном из цилиндров практически не сказалось на спектральном составе сигнала датчика частоты вращения КВ, поэтому использовать спектральный состав для оценки технического состояния дизеля не представляется возможным. В частотном представлении (спектре) сигнала не учитывается временной фактор, что существенно уменьшило информативность полученных данных.

Учет локальные особенности сигнала частоты вращения КВ позволяет вейвлет-преобразование [8]. Непрерывное вейвлет-преобразование сигнала $f(t)$ имеет вид

$$\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt, \quad (1)$$

где s — параметр масштаба;

τ — сдвиг по времени, с;

ψ^* — комплексно-сопряженный материнский вейвлет.

В данном преобразовании материнский вейвлет (всплеск) $\psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right)$ — оконная функция, которая сдвигается по времени на величину τ и меняет ширину (масштаб) вследствие изменения параметра s . Разработаны материнские вейвлеты Хаара, Добеши, Симлета, Койфлета, Мейера, Морле, Шенона и т. д. [9].

В настоящей статье рассматривается возможность применения вейвлет-преобразования для оценки технического состояния дизеля. В качестве диагностического сигнала используется выходное напряжение импульсного датчика частоты вращения КВ электронного регулятора ЭРЧМ30Т дизеля 5Д49 тепловоза 2ТЭ116У. Запись сигнала датчика осуществлялась с периодом дискретизации 5 мкс при работе дизеля под нагрузкой с частотой вращения КВ 845 об/мин в следующих режимах: включены все 16 цилиндров, отключен 5-й правый цилиндр, отключен 8-й правый цилиндр, отключены 5-й и 8-й правые цилиндры. Зубчатый венец диска пластинчатой муфты, на котором установлен датчик, имеет 124 зуба, и рабочий цикл двигателя соответствует 248 им-

пульсам выходного напряжения датчика. Форма импульсов выходного напряжения датчика представлена на рис. 3.

Результат вейвлет-анализа во многом определяется выбором материнского вейвлета, форма кривой которого должна в наибольшей степени совпадать с формой кривой диагностического сигнала исправного объекта. В данном случае сигнал частоты вращения периодический, по форме близкий к гармоническому (рис. 3). Поэтому для анализа сигнала в качестве материнского выбран вейвлет Морле (рис. 4), функция которого имеет вид

$$\psi^* = e^{-\left(\frac{t-\tau}{\sqrt{2}xs}\right)^2} \times e^{i \times 2\pi \times t} \quad (2)$$

Результаты вейвлет-преобразования (скалограммы) исходных сигналов с использованием вейвлета Морле (2) представлены на рис. 5, 6.

Скалограммы диагностических сигналов при всех работающих и одном отключенном цилиндре имеют заметные визуальные отличия значений амплитуды вейвлет-преобразования. Аналитическая оценка этих отличий может быть выполнена с использованием корреляционного анализа. Для этого выделяется фрагмент скалограммы каждого из сравниваемых сигналов, соответствующий двум полным оборотам КВ (рабочему циклу двигателя). Затем для скалограммы сигналов при всех работающих цилиндрах (исправный двигатель), определяется масштаб (сечение), которому соответствует максимальная

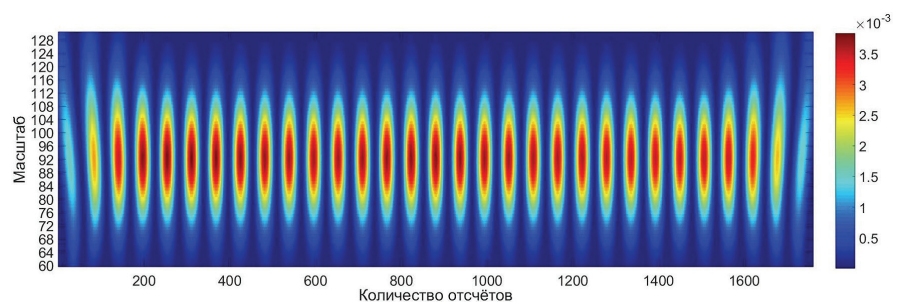
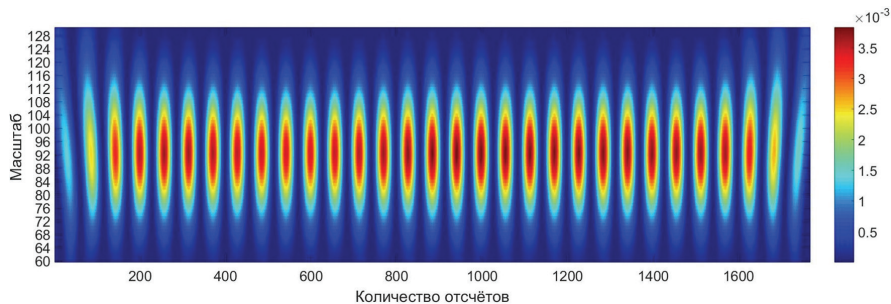


Рис. 5. Скалограмма частоты вращения при всех работающих цилиндрах



энергия преобразованного сигнала, т. е. выполняется условие

$$\sum_{i=1}^m \hat{\psi}(\tau, s_{max})^2 = \max(\sum_{i=1}^m \hat{\psi}(\tau, s_1)^2, \dots, \sum_{i=1}^m \hat{\psi}(\tau, s_n)^2), \quad (5)$$

где m — количество отсчетов скалограммы, соответствующее 248 зубьям диска датчика; n — количество учитываемых масштабов скалограммы.

Рис. 6. Скалограмма частоты вращения при отключенном 5-м правом цилиндре

Таблица 1. Матрица коэффициентов автокорреляции Пирсона при всех работающих цилиндрах

Зубья	Интервалы													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0,977	0,999	0,984	0,999	0,993	0,998	0,974	0,999	0,987	0,999	0,977	0,990	0,975	0,997
2	0,989	0,999	0,993	0,998	0,996	0,998	0,986	0,999	0,987	0,999	0,989	0,989	0,986	0,999
3	0,990	0,999	0,994	0,999	0,996	0,999	0,973	0,996	0,988	0,995	0,979	0,995	0,986	0,998
4	0,990	0,999	0,995	0,997	0,994	0,999	0,973	0,998	0,977	0,999	0,990	0,994	0,973	0,996
5	0,991	0,998	0,989	0,997	0,996	0,999	0,974	0,999	0,989	0,994	0,982	0,985	0,971	0,999
6	0,981	0,999	0,996	0,996	0,991	0,999	0,986	0,998	0,978	0,999	0,992	0,992	0,969	0,999
7	0,981	0,996	0,980	0,998	0,998	0,994	0,974	0,999	0,978	0,994	0,984	0,997	0,967	0,999
8	0,992	0,999	0,981	0,998	0,994	0,999	0,986	0,997	0,979	0,999	0,986	0,999	0,966	0,999
9	0,982	0,999	0,991	0,998	0,995	0,998	0,986	0,999	0,990	0,984	0,994	0,990	0,964	0,999
10	0,983	0,998	0,967	0,997	0,988	0,998	0,974	0,997	0,980	0,999	0,988	0,999	0,963	0,999
11	0,993	0,995	0,996	0,979	0,996	0,999	0,994	0,999	0,997	0,998	0,995	0,978	0,977	0,994
12	0,984	0,998	0,967	0,994	0,990	0,998	0,975	0,997	0,983	0,999	0,982	0,997	0,961	0,995
13	0,993	0,994	0,991	0,985	0,997	0,999	0,987	0,997	0,993	0,997	0,992	0,999	0,987	0,993
14	0,954	0,998	0,968	0,996	0,979	0,991	0,975	1,000	0,984	0,999	0,986	0,999	0,975	0,996
15	0,993	0,998	0,991	0,979	0,990	0,999	0,986	0,997	0,985	0,999	0,995	0,999	0,974	0,993

Таблица 2. Матрица коэффициентов автокорреляции Пирсона при отключенном 5-м правом цилиндре

Зубья	Интервалы													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0,989	0,982	0,933	0,973	0,948	0,993	0,974	0,999	0,941	0,997	0,949	1,000	0,983	0,997
2	0,977	0,988	0,947	0,983	0,963	0,997	0,975	1,000	0,957	0,999	0,965	1,000	0,983	0,996
3	0,988	0,974	0,920	0,996	0,976	0,990	0,987	0,998	0,954	0,996	0,979	1,000	0,969	0,987
4	0,975	0,991	0,955	0,988	0,959	0,995	0,976	0,999	0,968	0,999	0,978	0,999	0,982	0,994
5	0,973	0,965	0,929	0,986	0,956	0,976	0,976	0,991	0,925	0,995	0,976	0,996	0,968	0,993
6	0,970	0,986	0,943	0,983	0,970	0,994	0,977	0,999	0,961	0,998	0,975	0,999	0,992	0,991
7	0,967	0,982	0,937	0,980	0,968	0,993	0,977	0,988	0,958	0,984	0,974	0,996	0,968	0,997
8	0,963	0,979	0,930	0,994	0,980	0,992	0,996	0,998	0,954	0,998	0,973	0,999	0,992	0,989
9	0,959	0,986	0,944	0,985	0,964	0,997	0,977	0,998	0,968	0,997	0,971	0,999	0,982	0,999
10	0,912	0,955	0,915	0,983	0,961	0,980	0,977	0,991	0,927	0,979	0,953	0,995	0,969	0,999
11	0,950	0,980	0,932	0,980	0,958	0,997	0,976	0,990	0,964	0,977	0,969	0,999	0,983	0,994
12	0,962	0,994	0,964	0,996	0,984	0,996	0,996	0,998	0,962	0,999	0,982	0,999	0,993	0,994
13	0,938	0,984	0,942	0,995	0,952	0,996	0,976	0,986	0,960	0,999	0,967	0,999	0,985	0,998
14	0,908	0,981	0,913	0,974	0,949	0,996	0,976	0,984	0,958	0,985	0,967	0,994	0,975	0,998
15	0,946	0,978	0,930	0,998	0,964	0,996	0,976	0,991	0,956	0,998	0,967	0,999	0,995	0,999

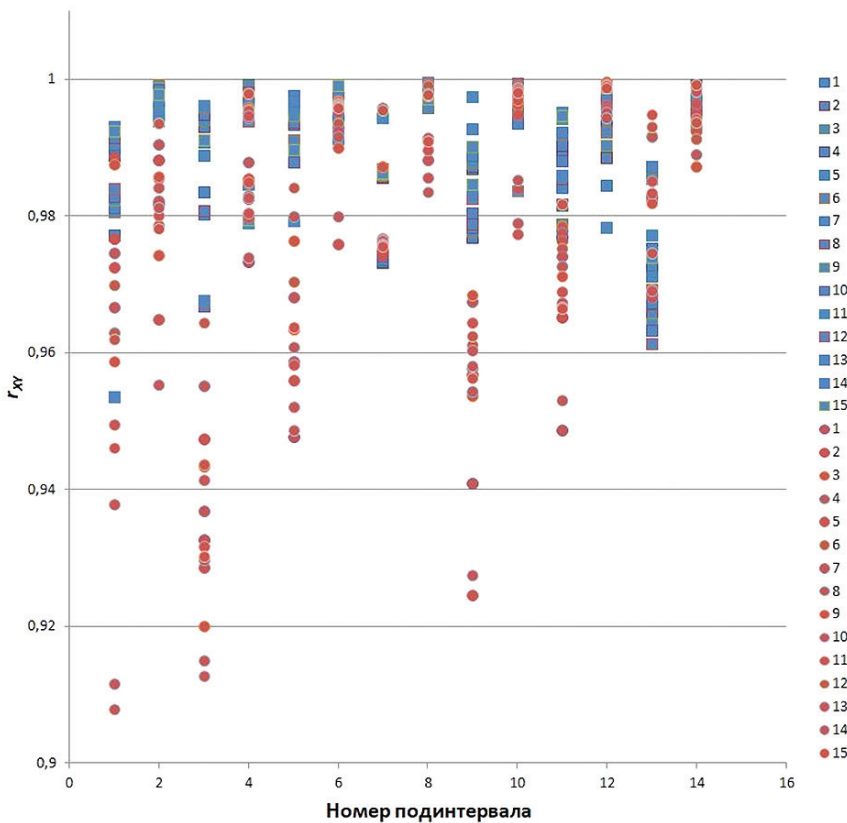


Рис. 7. Сравнение матриц коэффициентов корреляции Пирсона для сигналов частоты вращения при всех работающих (синие маркеры) и одном отключенном (красные маркеры) цилиндрах

Далее выделенные фрагменты скалограмм разбиваются на 16 (по количеству цилиндров) интервалов по 15 импульсов (зубьев) в каждом, сечения интервалов скалограмм сравниваются в пределах каждого сигнала с помощью коэффициента автокорреляции Пирсона

$$r_{xy} = \frac{\sum_{j=1}^l (x_j - \bar{x}) \times (y_j - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^l (x_j - \bar{x})^2 \times (y_j - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

где $X_j, Y_j - j$ -е значения скалограммы сигнала в сечении s_{max} для каждого сравниваемого интервала; \bar{X}, \bar{Y} – средние значения скалограммы сигнала в сечении на каждом сравниваемом интервале.

Для двигателя со всеми исправно и равномерно работающими цилиндрами и идеальным профилем зубьев диска, на котором установлен датчик частоты вращения, все интервалы кривой напряжения датчика, отвечающие каждому 15 зубьям диска (работе одного цилиндра), и соответствующие им интервалы скалограммы сигнала напряжения будут одинаковыми, при этом коэффициенты взаимной автокорреляции интервалов скалограммы будут равны единице.

Изменение качества рабочего процесса в отдельных цилиндрах будет приводить к изменению мгновенной угловой скорости вращения коленчатого вала в определен-

ные периоды рабочего цикла двигателя. В результате будет меняться форма кривой напряжения датчика и ее скалограммы на соответствующих интервалах, что приведет к уменьшению коэффициентов взаимной автокорреляции (4) по интервалам.

Результаты определения коэффициентов автокорреляции скалограмм сигналов датчика частоты вращения КВ при всех работающих цилиндрах и при отключенном 5-м правом цилиндре приведены в *таблицах 1, 2*, а также на *рис. 7*.

Значения коэффициентов автокорреляции интервалов скалограмм при всех работающих цилиндрах и отключенном 5-м цилиндре формируют отчетливые кластеры (*рис. 7*), что свидетельствует об изменении качества рабочего процесса в отдельных цилиндрах дизеля. При наличии датчика фазы, т. е. привязки сигнала датчика частоты вращения к верхней мертвой точке любого из цилиндров дизеля, взаимное расположение таких кластеров позволяет локализовать неисправный цилиндр.

Таким образом, применение аппарата вейвлет-преобразования позволяет существенно повысить достоверность контроля технического состояния многоцилиндрового дизеля по изменению мгновенной угловой скорости КВ. ■

Литература

1. Грищенко А. В., Грачев В. В., Курилкин Д. Н. и др. Изменение системы технического обслуживания локомотивов // Наука и образование транспорта. – 2017. № 1. С. 25-27.
2. Lin, T., Tan A. Lin Ma et al. Condition monitoring and fault diagnosis of diesel engine instantaneous angular speed analysis // Proceed. Institut. Mechan. Engineers/ Part C: J. Mechan. Engineer. Science. 2014. Vol. 229. Is. 2. P. 304–315.
3. Гребенников А. С., Гребенников С. А., Куверин И. Ю. и др. Развитие методологии диагностирования ДВС по показателям изменений угловой скорости коленчатого вала // Материалы международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте». 2015. С. 78-84.
4. Malaczynski G. W., Van der Poel R. Phase diagrams of different modes of misfire calculated from the digital Fourier transformation of angular crankshaft velocity // SAE Technic.l Paper 2010–01–0167. 2010. – URL: <https://doi.org/10.4271/2010-01-0167>.
5. Bulatovic Z. M., Stavlanjin M. S., Tomic M. V. et al. Measurement and analysis of angular velocity variations of twelve-cylinder diesel engine crankshaft, // Mechanic. Systems and Signal Proces. 2011. Vol. 25. Is. 8. P. 3043–3061.
6. Добролюбов И. П., Савченко О. Ф., Ольшевский С. Н. Принципы разработки компьютерной динамической модели автотракторных ДВС // Вестн. Новосибирск. гос. аграрного ун-та. 2014. № 2 (31). С. 141–146.
7. Способ определения технического состояния двигателей внутреннего сгорания и устройство для его осуществления: Пат. 2541072: МПК G01M 15/05 (2006.01) / Добролюбов И. П., Альт В. В., Савченко О. Ф., Ольшевский С. Н.; заявитель и патентообладатель Новосибирск. гос. аграрный ун-т. № 2012125779/06; заявл. 20.06.2012; опубл. 10.02.2015. Бюл. № 4.
8. Круглова Т. Н., Шурыгин Д.Н., Литвин Д. А. и др. Оценка эффективности различных методов анализа временных диагностических сигналов // Современные наукоемкие технологии. 2016, № 8-2. С. 237-241.
9. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. М. : ДМК Пресс, 2014. – 628 с.