

УДК 621.432.4:656.071.8(075.8)

**О ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ ЦИЛИНДРО-ПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДВС
МЕТОДОМ ЧАСТОТНО-АМПЛИТУДНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛА ВИБРАЦИИ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА**

В.А. Щеглов

**ABOUT DIAGNOSTICS OF CYLINDER-PISTON GROUP OF INTERNAL
COMBUSTION ENGINES METHOD FREQUENCY-AMPLITUDE ANALYSIS OF
VIBRATION SIGNAL USING WAVELET ANALYSIS**

V.A. Shcheglov

Аннотация. В вопросах своевременности технического ремонтно-обслуживающего воздействия на сложные объекты на первый план выходит определение временных параметров своевременности таких воздействий методами общей диагностики. В статье рассмотрены результаты проведенных экспериментов по обработке шумовых сигналов цилиндра работающего двигателя способом вейвлет-анализа. Такой способ, в отличие от анализа Фурье, позволяет фиксировать сигнал не только по частоте и амплитуде, но и по времени его прохождения. Это позволит повысить информативность полученного сигнала и, в конечном итоге, приведет к повышению достоверности диагностики.

Ключевые слова: шумовой сигнал; диагностика; ремонтно-обслуживающее воздействие; вейвлет-анализ; чувствительность диагностики; достоверность

Abstract. The issues of timeliness of technical repair and maintenance of impact on complex objects at the forefront of defining the time parameters for the timeliness of such influences are General methods of diagnosis. In the article the results of the experiments for processing noise signals of a cylinder working engine melting method of wavelet analysis. This method, unlike the Fourier analysis can be used to record a signal not only in frequency and amplitude, but to the time of his passing. This will allow to increase the information content of the received signal and, ultimately, will lead to improved reliability of the diagnosis.

Key words: noise signal; diagnostics; repair and maintenance operation; wavelet analysis; diagnostic sensitivity; precision.

Введение

Использование информации, заложенной в цифровых гармонических рядах представляет большие возможности в практике диагностики сложных технических изделий. Характерной особенностью этих рядов является то, что наблюдения за некоторым объектом производятся по амплитуде и частоте сигнала последовательно во времени. Целью проведенных исследований является поиск возможности анализа временных гармонических колебаний, полученных при функционировании технического объекта современными методами, широко применяемыми в различных областях, с целью повышения информативности, чувствительности и достоверности при проведении общей диагностики двигателей внутреннего сгорания.

Идея анализа гармонического ряда по Фурье состоит в том, чтобы выделить главные гармоники с последующим выявлением спектров амплитуд и частот. Однако, хорошо известный анализ способом Фурье обладает рядом недостатков, среди которых основными являются [1]:

1. Недостаточная информативность и практически полное отсутствие возможностей анализа по времени возникновения и форме амплитуд, слабые возможности в очистке от шума.

2. Гармонические построения Фурье не имеют возможности достоверно отражать форму сигналов с большой крутизной гармоник, так как для этого требуется громоздкие построения цифровых рядов.

Постановка задачи.

В ходе эксперимента проверить возможность применения вейвлет-преобразования для распознавания частотно-амплитудного вибросигнала по времени его существования

Методы исследования

На бензиновом двигателе Wolkswagen 1,8MT получен сигнал вибрации блока цилиндра. Частота вращения 2900 мин^{-1} , холостой ход.

Сигнал снят методом синхронного наложения сигналов с двух штатных датчиков: датчика угла поворота коленчатого вала (в верхней части) и широкополосного датчика детонации, расположенного между 2-м и 3-м цилиндрами.

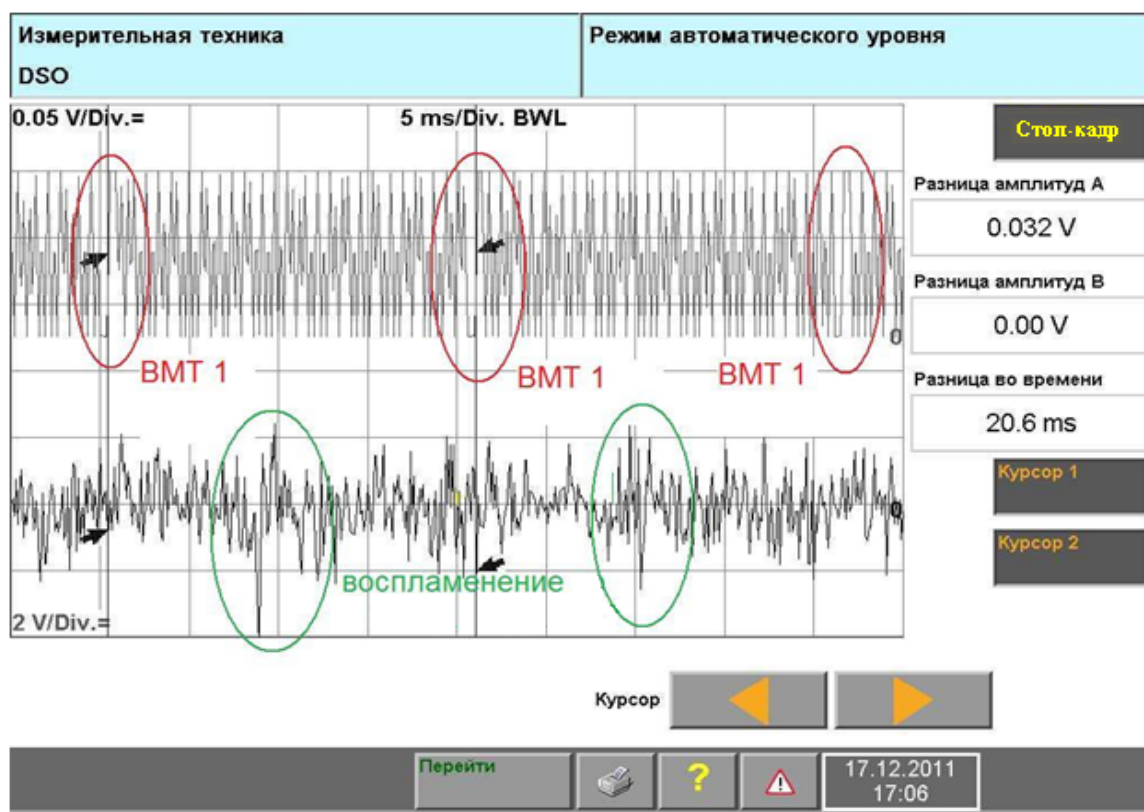


Рисунок 1 – Вибросигнал (внизу рисунка) и сигнал отметки с датчика угла поворота коленчатого вала

С использованием программы Graf2Digit снятый в ходе эксперимента вибросигнал (рис. 1), представленный также на рис. 2, оцифрован с шагом 0,0625 мс (миллисекунды). В результате получен цифровой массив M.

Главная сложность оцифровки вибросигнала заключалась в требовании описать измеренные значения кривой с возможно высокой точностью. Для этого выбран минимально возможный шаг дискретизации. По тереме Котельникова [2] такой шаг должен быть с частотой, вдвое превышающей частоту спектра. Таким образом, выбран шаг, равный 0,0625 мс.

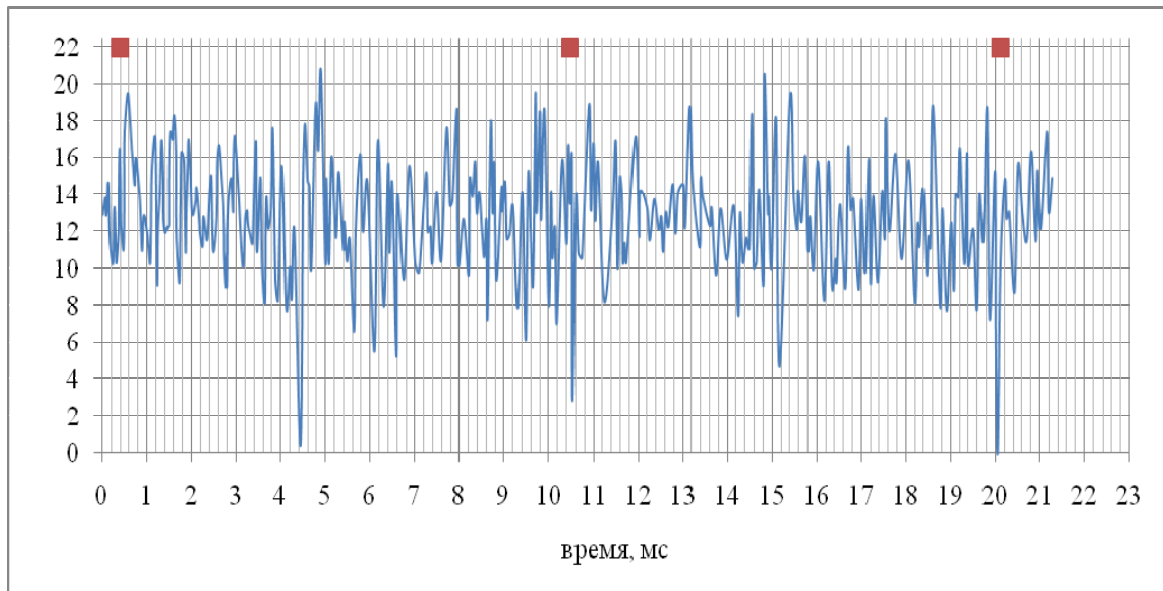


Рисунок 2 – Оцифрованное представление вибросигнала

Такой способ оцифровки дает гарантию сохранения оригинальности сигнала без потери отдельных малых по амплитуде и частоте всплесков, которые могут быть особо значимы при трактовке результатов эксперимента.

Математическая модель

В программной среде MatLab-7 разработана программа, позволяющая получить:

- представление вибросигнала в среде MatLab-7 (рис.3);
- частотно-амплитудный анализ сигнала с использованием преобразования Фурье (рис.4);
- частотно-временной анализ сигнала с использованием Вейвлет-преобразования с применением вейвлета Морле (рис. 5);

```
x=[0:0.0625:21.25];  
M=[12.93;...; 14.9];  
subplot(1,1,1)  
figure(1)  
plot(x,M)  
y=M+0.3*randn(size(x));  
Y=fft(M);  
Pyy=Y.*conj(Y)/230000;  
f=50*(0:200)/243;  
subplot(1,2,2)  
plot(f,Pyy(1:201)),grid  
% вейвлет-анализ  
x=[3.3:0.075:21.45];  
M=[16.91;...;14.9];  
subplot(1,1,1)  
figure(1)  
plot(x,M)  
>> subplot(312), c=cwt(x,1:64,'mexh', 'absglb',[0 40]);  
>> title('Вейвлет-спектр'); xlabel('Временный сдвиг, b');  
>> ylabel('Временной масштаб, a'); set(gca, 'Xlim', [0 24]);  
>> [c,l]=wavedec(s,6, 'db4');
```

```
>> for m=1:6
    d=detcoef(c,l,m); d=d(ones(1,2^m),:);
    cfd(m,:)=wkeep(d(:),1000);
end
>> cfd=cfd(:); I=find(abs(cfd)<sqrt(eps));
>> cfd(I)=zeros(size(I)); cfd=reshape(cfd,6,240);
>> subplot(313), colormap(pink(16));
>> img=image(flipud(wcodemat(cfd,64,'row')));
>> set(get(img, 'parent'),'YtickLabel', []);
>> title('Дискретное преобразование');
>> end
subplot(1,1,1)
figure(1)
plot(x,M)
>> subplot(312), c=cwt(x,1:640,'mexh', 'absglb',[0 400]);
>> title('Вейвлет-спектр'); xlabel('Временный сдвиг, b');
>> ylabel('Временной масштаб, a'); set(gca, 'Xlim', [0 240]);
>> [c,l]=wavedec(s,6, 'db4');
>> for m=1:6
    d=detcoef(c,l,m); d=d(ones(1,2^m),:);
    cfd(m,:)=wkeep(d(:),1000);
end
>> cfd=cfd(:); I=find(abs(cfd)<sqrt(eps));
>> cfd(I)=zeros(size(I)); cfd=reshape(cfd,6,24);
>> subplot(313), colormap(pink(16));
>> img=image(flipud(wcodemat(cfd,64,'row')));
>> set(get(img, 'parent'),'YtickLabel', []);
>> title('Дискретное преобразование');
>> end
```

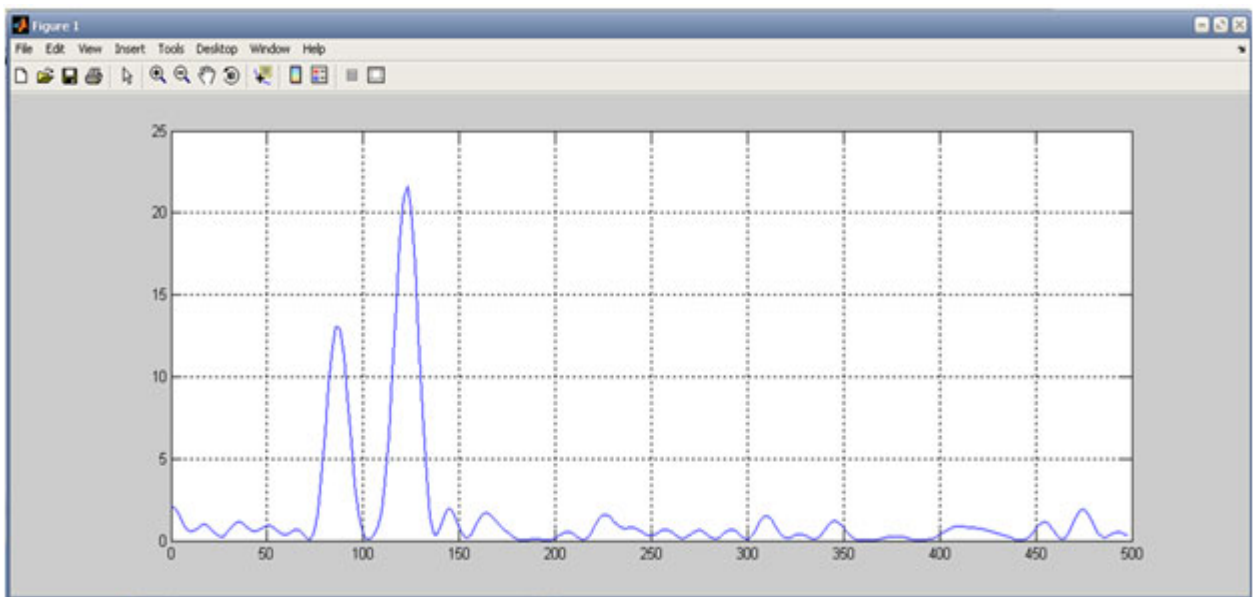


Рисунок 3 - Представление вибросигнала в среде MatLab-7

На рисунке 3 отчетливо виден гармонический характер виброколебаний и логическое соответствие между характерными всплесками в аналогичные по углу поворота коленчатого

вала отметки на всех цилиндрах двигателя. Со всей очевидностью на графике обнаруживается момент прохождения поршнем верхней мёртвой точки в рабочем такте с выраженным откликом вибрации в блока цилиндров.

Необходимо обратить внимание циклический характер гармонической кривой в период достижения максимального давления в цилиндре. При этом фаза процесса изменения формы на такте рабочего хода соответствует относительно низкой частоте. В этой связи следует отметить, что в научных публикациях относительно теории динамики процессов, имеющих место в двигателях внутреннего сгорания, обсуждается вопрос о возможном существовании волн давления низкой частоты в цилиндрах в рабочем такте бензиновых двигателей. Очевидно, что эти особенности указывают на проявление в этих волновых процессах частотных диапазонов различной высоты.

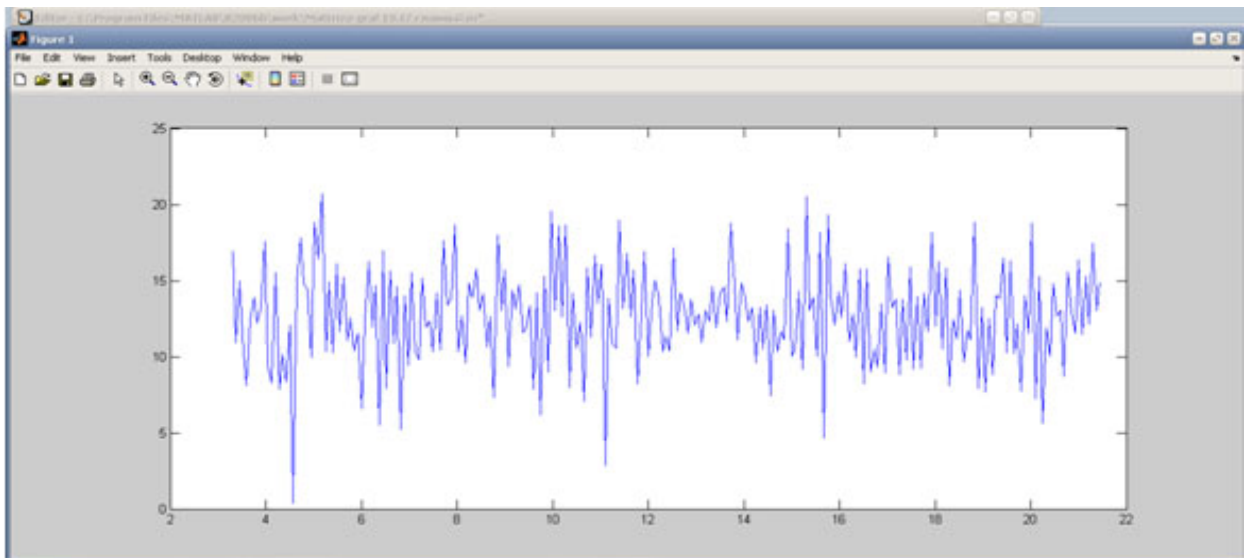


Рисунок 4 - Частотно-амплитудный анализ сигнала преобразованием Фурье

Из рисунка 4 можно сделать выводы:

1. Спектр частот в исследуемом сигнале от 0 до 500 Гц
2. Главные частоты с высокими амплитудами расположены вблизи 80-90 Гц и вблизи 110-120 Гц.
3. Высокочастотные (400-500 Гц) и низкочастотные колебания имеют небольшие амплитуды.
4. Этот анализ не дает ответа на вопрос: в какое время случаются те или иные частоты. Темные области – высокие амплитуды, полутемные – средние, светлые – низкие амплитуды.

Из рис.5 можно сделать следующие выводы:

1. Спектр частот в исследуемом сигнале от 0 до 640 Гц
2. Главные частоты с высокими амплитудами расположены вблизи 10-50 Гц и вблизи 110-120 Гц.
3. Высокочастотные (250-640 Гц) колебания имеют небольшие амплитуды.
4. Этот анализ дает ответ на вопрос: в какое время случаются те или иные частоты? Так видно, что частоты вблизи 120Гц присутствуют на всем протяжении сигнала. На всем протяжении сигнала присутствуют частоты 10-33 Гц. (темные полосы). Это колебания с высокой амплитудой.
5. На всем протяжении по времени присутствуют как средние частоты, так и низкие частоты.

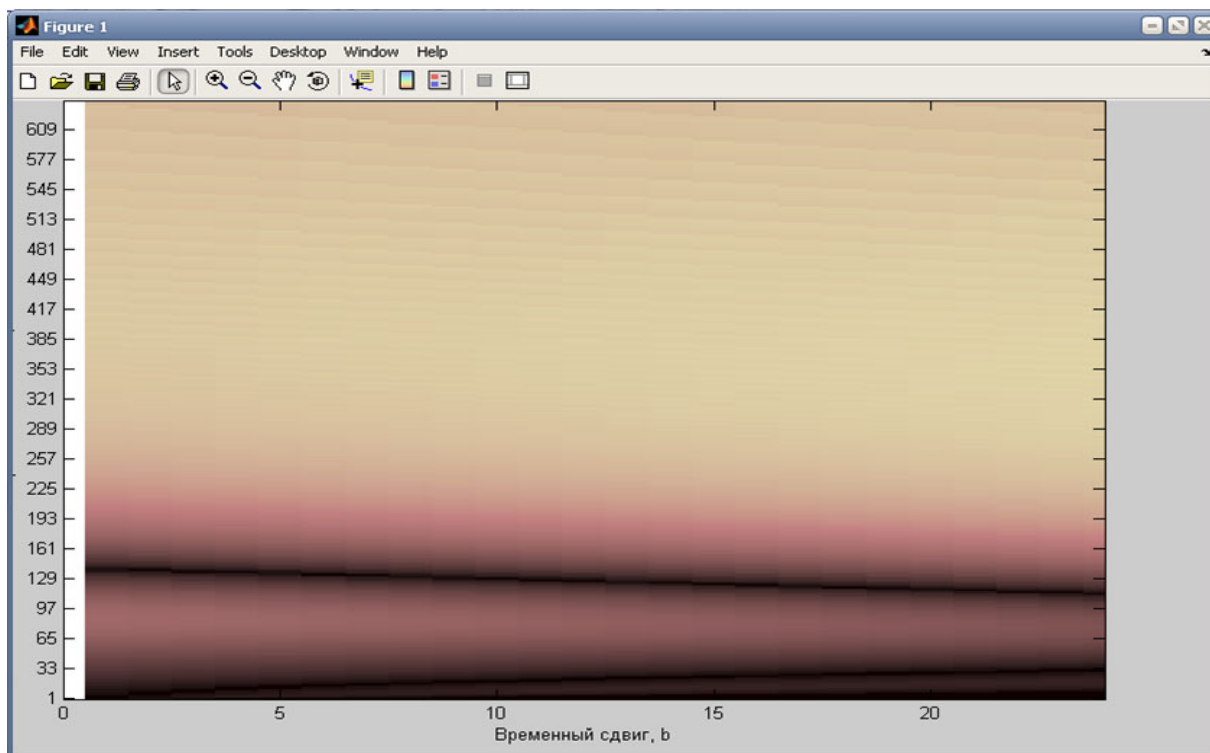


Рисунок 5 - Фазовый портрет - частотно-временной анализ сигнала с использованием Вейвлет- преобразования Морле (ось x – время в мс; ось y - частоты в Гц)

Из литературы [3] известно, что в высокочастотных областях находятся колебания типа “шум”, т.е. посторонние колебания, искажающие основной сигнал.

Обсуждение результатов

Оценка возможности применения способа вейвлет-преобразований в диагностике двигателей. Данный способ представляет новые возможности виброакустической диагностики цилиндрико-поршневой группы двигателя, базирующиеся на его основных преимуществах, в числе которых [3]:

- высокая чувствительность к формам малых амплитуд и длительности;
- возможности анализа нестационарных сигналов, где вейвлет-преобразование оказывается более эффективным, чем традиционное преобразование Фурье
- высокая чувствительность к малым отклонениям формы колебаний;
- возможность широкого выбора типа материнских вейвлетов, наиболее подходящих для локальных задач диагностики;
- возможность очистки от шума тестового сигнала с использованием функции `wdenctr`.

Эти преимущества представляют уникальные возможности, используя штатные датчики: датчик угла поворота коленчатого вала и широкополосный датчик детонации, не требующие калибровки и метрологического освидетельствования, разрабатывать алгоритмы и методики, позволяющие диагностировать зарождающиеся дефекты двигателей, элементы которых подвергаются ударно-импульсному воздействию.

Исследуемый способ анализа вибросигнала с поверхности блока цилиндра с использованием штатных датчиков не требует разборки двигателя, установки и настройки датчиков. Данный способ строится на основе анализа тренда результатов измерений вибрации корпусных деталей блока цилиндров двигателя, выполненных в разных временных

отрезках жизненного цикла, он не предъявляет высокие требования к качеству виброакустических измерений. Выполнить подобные измерения может любой опытный диагност, что увеличивает достоверность проводимого анализа. Однако некоторые трудности создает требование обеспечения идентичности режимов работы исследуемых двигателей, без соблюдения которой чувствительность, точность и достоверность не позволят оценить тренд изменения состояния [4].

Все это открывает перспективы создания методики аналитической формализации полученного вибросигнала, основанного на объективных определениях амплитудно-частотного спектра акустических процессов, разнесенных во времени. Можно рекомендовать следующий алгоритм разработки эталонов состояния двигателя [4]:

- вибросигналы от дефектного и заведомо исправной цилиндрико-поршневой группы двигателя исследуются на наличие ударных импульсов;
- выделяются характерные импульсы, определяется их частотно-амплитудный спектр с привязкой во времени с учётом рекомендаций, приведенных выше ;
- проводится анализ этих импульсов в области «форма-время» для характерных частот, определенных как ударные;
- используя данные фазовых портретов выделяются признаки, несущие диагностические возможности, в качестве которых могут использоваться форма импульсов, значения характерных амплитуд и частот для неисправного и исправного состояний [4].

Полученные в результате анализа данные закрепляются как эталоны, которые в последствии можно использовать для практической реализации при проведении диагностики. Это позволит создавать эталоны для каждого образца двигателей, что дает возможность в дальнейшем отслеживать изменение технического состояния диагностируемого изделия.

Проблемы, которые необходимо решить в дальнейшем.

1. Является ли колебательная система - «двигатель» – линейной, а сигнал вибрации - нестационарным. Для чего необходимо экспериментально подтвердить, что после удара, поршня о стенку цилиндра возникает вынужденные колебания, которые после прекращения воздействия переходят в собственные колебания (затухающие по экспоненте).

2. Подобрать соответствующие фильтры, позволяющие из сигнала убрать шум. Выделить сигналы ударов при перекладке поршня.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Фатьянов М. П. Применение метода кросс-вейвлетов для анализа финансовых рядов // Молодой ученый, 2014. № 3. С. 83.
2. Котельников В. А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи // Успехи физических наук, 2006. № 7. С. 762-770.
3. Прыгунов А.И., Папуша А.Н. Нелинейные резонансы механических систем как диагностические признаки / Сб. материалов 9-ой Межвузовской школы-семинара «Методы и средства технической диагностики», кн. 2. Ивано-Франковск: Облполиграфиздат, 1990. С. 43-49.
4. Прыгунов А.И. Анализ формы: новый метод исследования сигналов // Турбины и дизели, 2008. №3. С. 12-17.



ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Щеглов Валерий Александрович

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВПО «Калининградского государственного технического университета», г. Калининград, Россия, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры автомобильного транспорта и сервиса автомобилей,

E-mail: shceglov@rambler.ru

Shcheglov Valeriy Alexandrovich

Baltic Fishing Fleet State Academy of the FSEI HPE «Kaliningrad State Technical University», Kaliningrad, Russia, Ph.D., associate Prof., Professor of road transport and service vehicles,

E-mail: shceglov@rambler.ru

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с автором статьи:
236034, Россия, Калининград, ул.Молодежная, 6, БГАРФ, каф. АТ и СА, каб. 207. Щеглов В.А.
8(4012)92-51-23, 8-909-78-71-797