

**ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ**

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-4-76-83

УДК 53.083(430.1)

**ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ВИБРОАНАЛИЗУ
В РАМКАХ СОЗДАНИЯ МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ ГОРНО-ШАХТНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ****SUBSTANTIATION OF AN INTEGRATED APPROACH TO VIBROANALYSIS IN
THE FRAMEWORK OF CREATING A TEST PROCEDURE FOR MINING
EQUIPMENT****Герике Павел Борисович,**

кандидат техн. наук, доцент, e-mail: am_besten@mail.ru

Gerike Pavel B., C. Sc. (Engineering), Associate Professor

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, 650065, г. Кемерово пр. Ленинградский, 10

Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, 10 Leningradsky Prospect, 650065, Kemerovo, Russian Federation.

Аннотация. Настоящая работа основана на результатах анализа эффективности использования различных методов вибрационного контроля в качестве составляющих элементов комплексного диагностического подхода к анализу параметров вибрации горной техники. Принцип комплексного подхода к диагностике сложных механических систем рассматривается в контексте создания современной методики проведения испытаний горного оборудования, основанной на использовании неразрушающего контроля и прогностического моделирования. В работе подробно рассмотрены вопросы выбора конкретных методов виброанализа в зависимости от типа объекта испытаний, режимов его работы, приоритетного типа проводимых испытаний. Исследование параметров виброакустических характеристик, генерируемых при работе энерго-механического оборудования технических устройств, эксплуатируемых в условиях угольной и горнорудной промышленности Кузбасса, позволило осуществить подробную классификацию дефектов по их типу и степени опасности. Определено, что дефектам горно-шахтного оборудования соответствует более ста двадцати диагностических признаков по параметрам вибрации, формализованных для удобства их использования при разработке кода алгоритма автоматизированного контроля сложных систем по частотным наборам базовых признаков. Полученные результаты позволили обосновать эффективность применения на практике конкретных наборов диагностических признаков, критериев и методологий анализа параметров виброакустических сигналов. Показано, что только с широким использованием результатов, полученных с применением современных методов вибрационной диагностики, появляется возможность для эффективного выявления дефектов оборудования сложной техники и разработки адекватных деградиционных прогностических моделей. Доказано, что созданный комплекс диагностических правил, объединивший признаки сразу семи диагностических подходов, пригоден для выявления дефектов энерго-механического оборудования горных машин по результатам анализа генерируемых при их работе механических колебаний. Реализация принципов комплексного диагностического подхода открывает инновационное направление для разработки единых диагностических критериев оценки фактического состояния сложных механических систем. Результаты комплексного анализа параметров исходных полигармонических волн также могут быть эффективно применены для осуществления краткосрочного прогнозирования процесса деградации фактического состояния узлов и агрегатов горной техники.

Abstract. This work is based on the results of the analysis of the effectiveness of the use of various methods of vibration control as components of a complex diagnostic approach to the analysis of vibration parameters of mining equipment. The principle of the integrated approach to the diagnosis of complex mechanical systems is used to create a modern methodology for testing mining equipment based on the principles of non-destructive testing and predictive modeling. The paper describes the selection of specific methods for vibration analysis, depending on the type of a test object, its operating modes, and the type of tests. The study of the parameters of

vibro-acoustic characteristics generated during the operation of the energy-mechanical equipment of technical devices operated in the coal and mining industry of Kuzbass made it possible to carry out a detailed classification of the defects by their type and degree of danger. It has been identified that more than one hundred and twenty diagnostic features correspond to defects in mining equipment by vibration parameters. These features have been formalized on the basis of frequency sets of basic characteristics for the convenience of their use when developing the code for the algorithm for automated control of complex systems. The effectiveness of practical application of concrete sets of diagnostic features, criteria and methodologies for analyzing the parameters of vibroacoustic signals is substantiated in the work. It is shown that only with the wide use of the results obtained with the use of various modern methods of vibration diagnostics, there is an opportunity for effective detection of equipment defects and development of adequate degradation predictive models. It is proved that the created set of diagnostic rules, combining in one go the signs of seven diagnostic approaches, is suitable for detecting defects in energy-mechanical equipment of mining machines based on the analysis of mechanical oscillations generated during their operation. The implementation of the principles of the comprehensive diagnostic approach opens up an innovative direction for the development of unified diagnostic criteria for estimating and predicting the process of changing the actual state of complex mechanical systems. The results of a complex analysis of the parameters of the initial polyharmonic waves can also be effectively applied for the short-term prediction of the degradation of the actual state of assemblies and aggregates of mining equipment.

Ключевые слова: вибродиагностика, методика испытаний, энерго-механическое оборудование, комплексный диагностический подход, управление техническим обслуживанием.

Keywords: vibration analysis, resource test methodology, energy-mechanical equipment, comprehensive diagnostic approach, maintenance management.

Эффективность применения результатов комплексного диагностического подхода для решения задач неразрушающего контроля и практического виброанализа энерго-механического оборудования убедительно доказана в работах Баркова А.В., Гольдина А.С., Капанова Б.И., Ключева В.В., Лукьянова А.В., Соловьева А.Б., Ширмана А.Р. и многих других отечественных и зарубежных ученых. Однако, применительно к вопросу создания современной методики испытаний горно-шахтного оборудования такая задача ставится впервые. Ведь мало доказать принципиальную эффективность комплексного подхода, нужно еще и осуществить обоснованный выбор конкретного набора методов и средств диагностирования с учетом специфики конструктивных особенностей горных машин и условий проведения испытаний.

Таким образом, обоснование комплексного диагностического подхода применительно к анализу параметров вибрации, генерируемой при работе горно-шахтного оборудования, является актуальной научной задачей, поставленной перед учеными Федерального Исследовательского Центра угля и углехимии СО РАН в рамках выполнения научно-исследовательских работ по разработке систем диагностики технического состояния и оценки остаточного ресурса горных машин. Очевидно, что только результаты комплексного анализа параметров полигармонических волн позволят сформировать оптимальную совокупность диагностических правил, в полной мере отвечающую адекватному представлению о наличии тех или иных дефектов энерго-механического оборудования, причем большинство вибрационных процессов необходимо рассматривать в динамике их развития по причине значительной флуктуации амплитуд значащих гармоник. Выбор диагностических методов должен осуществляться с учетом существующих ограничений на область их применения, технических возможностей используемой аппаратуры и программного обеспечения, конструктивных особенностей и режимов работы горной техники [1, 2, 3].

Для решения поставленной задачи был проведен анализ значительного объема диагностической информации, полученной на представительной выборке горного оборудования с использованием большого числа методов вибродиагностики, что позволило осуществить обоснованный выбор набора диагностических признаков, методов и правил, позволяющих получить необходимый и достаточный минимум полезной информации об объекте испытаний. Данные замеров анализировались с применением метода ударных импульсов, спектрального анализа, анализа огибающей, характеристики разгона/выбега агрегата, тест-удара для определения собственных частот конструкции, анализа траектории движения вала ротора, вейвлет-преобразования и кепстрального анализа, а также анализа временной реализации виброакустического сигнала.

Результаты выполненного анализа позволили определить набор диагностических методологий, наилучшим образом подходящий для диагностирования оборудования горных машин по параметрам вибрации и разработать специализированный комплекс диагностических правил для выявления дефектов горно-шахтного оборудования. В общем виде удалось формализовать более 120 признаков для диагностирования семи основных групп дефектов обследуемого оборудования (среди которых нарушение жесткости системы, расцентровка валов, дефекты подшипников и зубчатых передач, неуравновешенность вращающихся деталей, дефекты электрической природы, дефекты ременных передач).

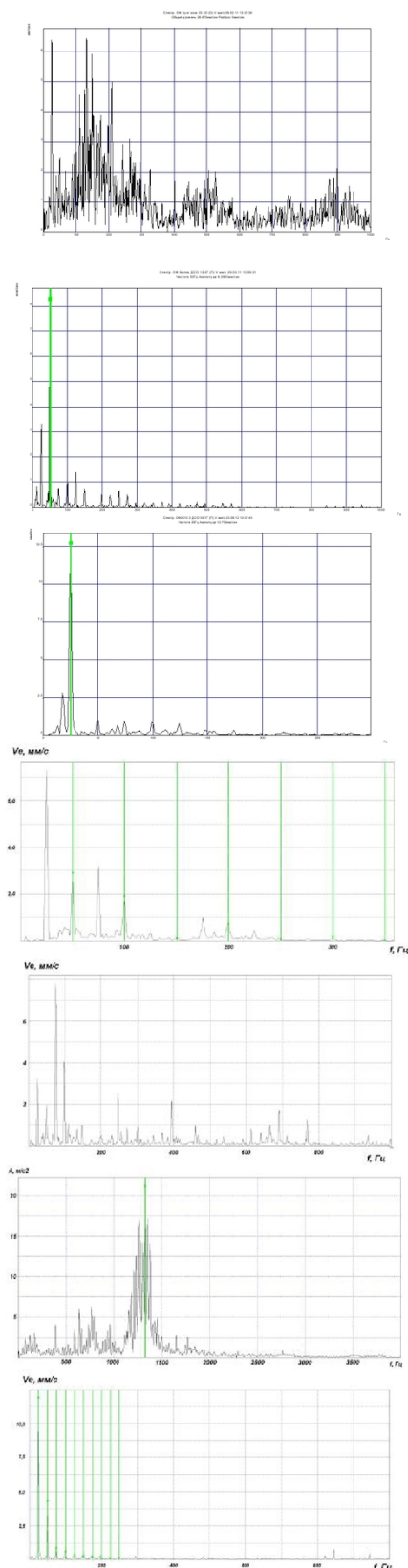


Рис. 1. Примеры спектров, иллюстрирующих наличие семи базовых групп дефектов энерго-механического оборудования горных машин.

А) Дефект зубчатой пары редуктора конвейера КЛ-1000, $V_{eCK3}=28,7$ мм/с.



Б) Расцентровка электродвигателя элеватора ЭЛГ-450 с редуктором, нарушение жесткости системы.

В) Дисбаланс ротора электродвигателя мокрого пылеуловителя ПМ-35.

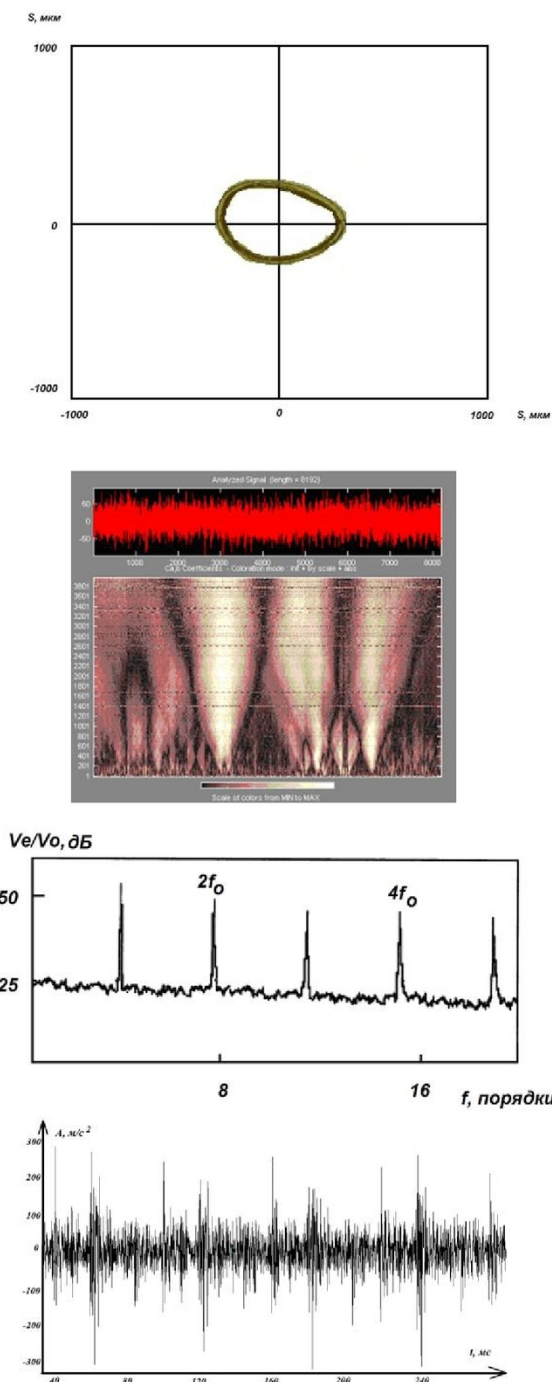
Г) Замыкание обмоток асинхронного электродвигателя экскаватора ЭКГ-5А.

Д) Ярко выраженное нарушение жесткости опорной системы. Ослабление крепежа электродвигателя к редуктору механизма поворота экскаватора ЭШ 6/45.

Е) Развитие дефекта подшипника возбудителя, общий уровень сигнала по параметру виброускорения $A_{CK3}=68$ м/с².

Ж) Нарушение соосности шкивов ременной передачи привода газоочистной установки.

До 80 % признаков, подвергшихся формализации, сосредоточены в области прямого спектрального анализа, что объясняется сложностями алгоритмизации наборов диагностических правил с приме-



А) Орбита синхронного виброакустического сигнала, записанная на подшипниковой опоре сетевого двигателя экскаватора ЭШ 6/45. Форма кривой свидетельствует о развитом дисбалансе ротора электрической машины.

Б) Пример полигармонической волны и результатов ее вейвлет-преобразования, позволивших диагностировать начальную стадию локального абразивного износа зубьев редуктора скребкового конвейера.

В) Спектр огибающей вибросигнала, содержащий признаки наличия раковины наружного кольца подшипника электродвигателя.

Г) Пример анализа временной реализации сигнала подшипника коленчатого вала двигателя ЯМЗ-240 НМ2. Частота ударных импульсов соответствует удвоенной частоте вращения коленчатого вала, диагностирован износ шлицов вала привода вентилятора.

Рис. 2. Результаты анализа параметров исходных полигармонических волн с применением комплексного диагностического подхода.

нием других методологий, использование которых часто оправдано только в случаях наличия неявного результата диагностирования или для подтверждения правильности уже поставленного диагноза.

Так, на рисунке 1 представлены результаты спектрального анализа полигармонических волн, записанных на оборудовании горных машин. Данные спектры иллюстрируют наличие диагностических признаков семи основных групп дефектов, получивших повсеместное распространение на горношахтном оборудовании. Каждой из представленных групп соответствует до десятка базовых дефектов и от пяти до сорока диагностических признаков, большей частью сосредоточенных в области спектрального анализа [4, 5, 6]. Именно многообразие диагностических признаков является главной причиной, позволившей сделать метод спектрального анализа базой для комплексного диагностического подхода.

Существенные ограничения на применение большинства методов виброанализа накладывает реализация принципов диагностирования тихоходных редукторов или оборудования, имеющего очень короткий рабочий цикл [7, 8].

В таких условиях использование функции усреднения измерений спектральных характеристик или эксцесса является невозможным. Для решения этой задачи эффективным может оказаться применение низкочастотных датчиков (от 0,3 Гц), имеющих высокую чувствительность и хорошую линейность амплитудно-частотной характеристики (неравномерность АЧХ максимум ± 3 дБ), в сочетании с, например, таким методом анализа, как временная реализация сигнала [9]. Действительно, временной анализ с успехом может применяться для диагностирования практически любых типов дефектов энерго-механического оборудования горных машин, однако наилучшие результаты могут быть получены именно тогда, когда большинство других методов являются малоинформативными или вообще не могут быть реализованы. Это объясняется сложностью анализа зашумленного виброакустического сигнала, что позволяет рекомендовать использование данного метода лишь в качестве дополнения к базовому набору диагностических методологий. В частности, область эффективного применения временного анализа могут стать тихоходные узлы и агрегаты, в т.ч. подшипники качения, зубчатые передачи и прочие элементы оборудования горных машин (см. рисунок 2).

В любом случае, в заданных условиях должны применяться аппаратные средства контроля, позволяющие записать сигнал вибрации за минимально возможное время в как можно более широком частотном и динамическом диапазоне (обычно, расширенный измерительный диапазон должен включать в себя частоты от 0,5 до 10 000 Гц и возможность записи уровня виброускорения до 300 м/с² [10]).

Результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что для осуществления контроля по параметрам вибрации энерго-механического оборудования горных машин в стендовых условиях эффективную и достаточно полную диагностическую информацию при минимальных затратах времени можно получить, основываясь на результатах спектрального анализа параметров виброскорости и виброускорения в расширенном частотном диапазоне, анализе огибающей спектра и эксцессе. Доказано [8, 11], что именно такой набор диагностических методов является наиболее оптимальным для относительно быстрого получения достоверной информации об объекте испытаний. Анализ огибающей (см. пример на рисунке 2), получивший широкое распространение благодаря программной реализации в виброанализаторах производства отечественных и зарубежных компаний, является прекрасным дополнением к прямому спектральному анализу, обладая широкой областью применения (диагностика подшипников, зубчатых передач, насосов, компрессоров и т.д.), высокой достоверностью постановки диагноза по результатам единственного замера и хорошей чувствительностью к изменению диагностических параметров [12]. Вместе с тем, реализация принципов выделения огибающей в рамках проведения испытаний горной техники лишается своего главного недостатка – необходимая для анализа информация о частоте вращения, геометрических параметрах подшипников и кинематике зубчатых передач априори является доступной уже на этапе настройки диагностической аппаратуры.

В случае, когда измерения проводятся на объекте испытаний в условиях его реальной эксплуатации на промышленном предприятии, комплексный подход может быть ограничен результатами спектрального анализа и анализа огибающей. В этом случае анализ диагностических данных должен осуществляться без применения эксцесса, т.к. данный метод требует довольно значительного времени на обработку сигнала и не может быть применен для диагностики зубчатых передач и других механизмов, работа которых связана с наличием ударных нагрузок [13, 14].

В ряде случаев эффективной может оказаться реализация методологических подходов кепстрального анализа, применяемых для диагностики зубчатых зацеплений в редукторах переборного и планетарного типов, получивших широкое распространение в конструкции горных машин. Преимущества данного метода, такие как слабая чувствительность к специфике распространения виброакустических волн и изменению фазы исследуемого сигнала, делают использование метода удобным в ряде случаев, когда измерительные точки на редукторах являются труднодоступными и измерения приходится осуществлять не в самих точках, а в непосредственной близости от них. При этом частотный состав регистрируемых кепстральных характеристик практически не подвергается искажению. Однако, анализ получаемых кепстров существенно затрудняет сложность интерпретации получаемых результатов диагностирования, и, как следствие, появляется необходимость длительного обучения специалистов навыкам проведения анализа. Все эти перечисленные факторы не позволяют рекомендовать данный метод анализа к реализации в рамках комплексного диагностирования объекта испытаний, однако он может успешно применяться в качестве дополнительного метода контроля с целью уточнения результатов диагностики в сложных или спорных случаях.

Кроме того, дополнительные преимущества для диагностики предоставляет анализ характеристики выбега роторного агрегата, позволяющий провести четкую ассоциативную связь между наличием дефектов электрической природы (замыкание обмоток статора, асимметрия электромагнитного поля и т.д.)

и параметрами виброакустического сигнала, что не всегда возможно сделать при использовании стандартных методов виброанализа.

Среди прочего, эффективным может оказаться применение техники вейвлет-преобразования, которая позволяет с высокой степенью детализации оценить влияние составляющих виброакустического сигнала, незначительных по своему вкладу в общий уровень волны, но несущих полезную диагностическую информацию о зарождающихся или уже развитых дефектах энерго-механического оборудования.

Однако, несмотря на высокую степень информативности (см. пример на рисунке 2) и чувствительность к малейшим изменениям параметров виброакустического сигнала, использование техники вейвлет-преобразования в рамках проведения испытаний горных машин не всегда является целесообразным из-за сложности интерпретации получаемых данных и значительного времени, требующегося на проведение анализа [7, 16].

В рамках выполнения настоящего исследования, помимо прочего, были осуществлены экспериментальные работы по изучению эффективности применения результатов анализа траектории движения вала ротора в рамках поставленной задачи по обоснованию комплексного диагностического подхода к анализу параметров вибрации. Полученные результаты [8, 10] не позволяют рекомендовать данный метод для использования в качестве базового или даже дополнительного метода из-за длительного времени, затрачиваемого на сбор и анализ диагностической информации, записываемой синхронно по двум измерительным трактам.

Другой методологический подход к анализу вибрации, такой как тест-удар, с успехом может быть реализован при проведении испытаний новых образцов горной техники. Область применения данного метода обычно ограничена определением собственных частот лопаток промышленных вентиляторов (см. рисунок 3), однако, логично заключить, что и для определения частот впервые сконструированных машин и агрегатов такой метод может оказаться весьма полезен. Действительно, проблема возникновения резонансов и минимизация их последствий для сложных механических систем является весьма актуальной [4, 5, 10, 11]. В условиях лаборатории, а также непосредственно *in situ*, данный метод может быть весьма эффективно применен для выявления совпадения частот резонанса конструкции с рабочими частотами агрегатов, что на этапе проведения испытаний горной техники позволит вовремя предложить

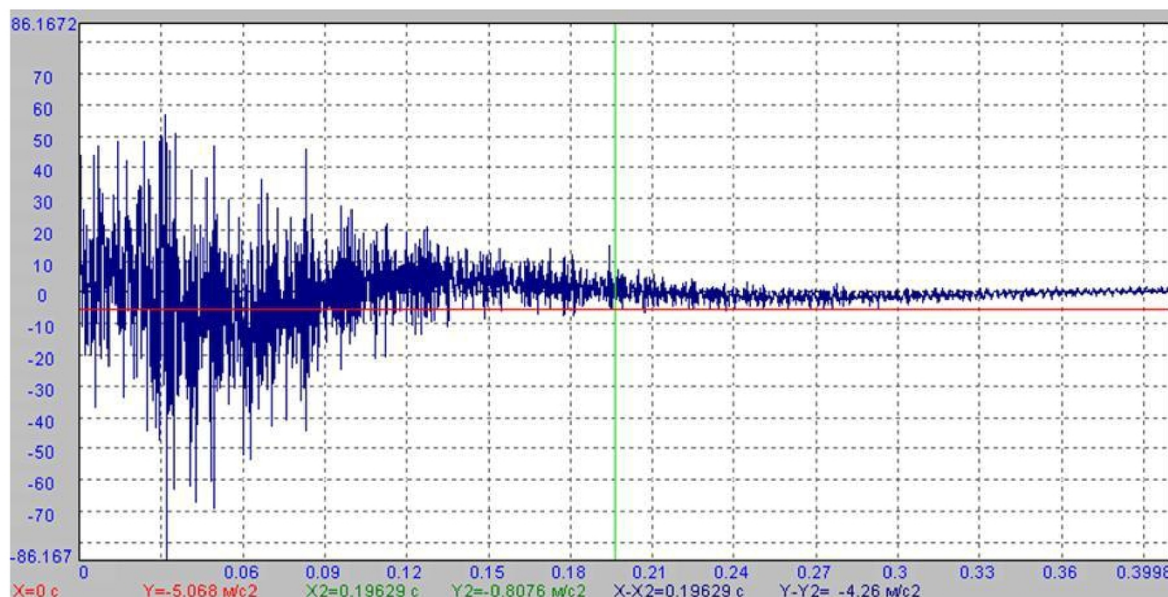


Рис. 3. Пример полигармонической волны, записанной при тест-ударе.

обоснованные рекомендации по внесению необходимых изменений в конструкцию объекта.

Применение описанных выше диагностических методов может быть оправдано для проведения детального анализа диагностических характеристик и уточнения правильности поставленного диагноза в том случае, когда конструктивные и кинематические особенности объекта испытаний вносят непредвиденные сложности в процесс диагностики. Причинами возникновения этих дополнительных сложностей могут быть: искажение виброакустического сигнала из-за специфики расположения и затрудненного доступа к измерительным точкам на агрегате; зашумленность спектра из-за взаимного перекрытия диапазонов частот, генерируемых различными источниками; совпадение частотных признаков дефектов различной природы из-за особенностей кинематики механизмов [15], вплоть до 0,1 Гц и т.д.

Таким образом, обобщая вышесказанное, можно заключить, что комплексный диагностический подход к анализу параметров вибрации должен включать в себя реализацию следующих методов вибродиагностики:

- спектральный анализ (как наиболее универсальный метод), анализ огибающей спектра (подшипники качения и зубчатые передачи), эксцесс (экспресс-анализ состояния подшипников качения).

Кроме того, дополнительно к этим базовым методам, в ряде случаев, когда это необходимо, достаточно эффективно могут быть реализованы:

- анализ кепстра (диагностика зубчатых передач), анализ характеристики выбега (выявление дефектов электрической природы), тест-удар (для определения собственных частот агрегата), анализ временной реализации (диагностика тихоходных подшипников и редукторов).

Именно такое сочетание методов практического виброанализа позволит получить максимум ценной диагностической информации за относительно малое время, затрачиваемое на проведение измерений и анализ регистрируемых характеристик.

Таким образом, подводя итог вышесказанному, можно заключить, что результаты выполненных исследований в области изучения процессов развития и особенностей распространения механических колебаний позволили практически полностью формализовать правила оценки изменения спектрального состава полигармонических волн, генерируемых при работе энерго-механического оборудования горных машин. Полученные научные результаты положены в основу разрабатываемой методики испытаний горной техники, которая базируется на принципах реализации комплексного диагностического подхода к анализу параметров вибрации и прогнозирования процесса изменения состояния сложных механических систем с использованием принципов краткосрочного адаптивного моделирования процесса изменения единых диагностических критериев оценки фактического состояния объектов диагностирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trebuna F., Šimcak F., Bocko J., Hunady R., Pastor M. «Complex approach to the vibrodiagnostic analysis of excessive vibration of the exhaust fan», *Engineering Failure Analysis* #37 (2014). 86–95
2. Puchalski A. «A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», *Mechanical Systems and Signal Processing* #56-57(2015). 173–180
3. Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем. Дисс. ... канд. техн. наук. – М. – МИФИ. – 2007. – 170 с.
4. F. Balducchi, M. Arghir, S. Gaudillere. Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition GT2014*. June 16 – 20, 2014, Düsseldorf, Germany.
5. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005. – 828 с.
6. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.
7. Tse P., Peng Y., Yam R. Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis—Their Effectiveness and Flexibilities. *Journal of Vibration and Acoustics*. 2001. Vol. 123. Pp 303-310. DOI: 10.1115/1.1379745.
8. Герике П. Б. Выявление дефектов приводных станций скребковых конвейеров. // Вестник Кузбасского государственного технического университета, № 2. – Кемерово. – 2017. – С. 75-84.
9. Барков А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. Учебное пособие. /Барков А.В., Баркова Н.А. / Издательство СПбГМТУ. Санкт Петербург, 2004. — 156 с.
10. Герике П. Б. Диагностирование неисправностей оборудования технических устройств, эксплуатируемых на каменных карьерах Кузбасса /Герике П.Б., Никитин А.Г., Тагильцев-Галета К.В. // Вестник Кузбасского государственного технического университета, № 2. – Кемерово. – 2017. – С. 100-109.
11. V. Pozhidaeva. Determining the roughness of contact surfaces of the rolling bearings by the method of shock pulses. *World Tribology Congress III*, September 12-16, 2005, Washington, D.C., USA
12. Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration. *Journal of Mechanical Design*. 2008. Vol. 130. Pp 121402/1 - 121402-13. DOI: 10.1115/1.2976803
13. Кравченко, В. М. Повреждения подшипников качения в результате износа. /В. М. Кравченко, В. А. Сидоров, В. В. Буцукин. // Горное оборудование и электромеханика. - № 2, 2013. – С. 45-47.
14. Клишин В.И. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. /В.И. Клишин, Л.В. Зворыгин, А.В. Лебедев, А.В. Савченко/ Новосибирск, 2011. – 524 с.
15. Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков. Ещеркин П.В., автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово – 2012 год. – 18 с.

16. Bently D.E., Hatch C.T. "Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics", Bently Pressurized Press, 2002, P.726.

REFERENCES

1. Trebuna F., Šimcak F., Bocko J., Hunady R., Pastor M. "Complex approach to the vibrodiagnostic analysis of excessive vibration of the exhaust fan", Engineering Failure Analysis #37 (2014). 86–95 (Eng.)
2. Puchalski A. "A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics", Mechanical Systems and Signal Processing #56-57(2015). 173–180 (Eng.)
3. Sushko A. E. Razrabotka spetsial'nogo matematicheskogo i programmnoho obespecheniya dlya avtomatizirovannoy diagnostiki slozhnykh system [Development of special mathematical and software support for automated diagnosis of complex systems]: PhD thesis excerpt. Moscow. 2007. (Rus.)
4. F. Balducchi, M. Arghir, S. Gaudillere. Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings. Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition GT2014. June 16 – 20, 2014, Düsseldorf, Germany. (Eng)
5. Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik. V 7-kh tomakh [Non-destructive testing: Handbook. In 7 Vol. V.7] / Pod. red. V.V. Klyueva. Moscow: Mashinostroenie Publishers, 2005. p. 828 (Rus.)
6. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA. (Eng.)
7. Tse P., Peng Y., Yam R. Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis—Their Effectiveness and Flexibilities. Journal of Vibration and Acoustics. 2001. Vol. 123. pp. 303-310. DOI: 10.1115/1.1379745. (Eng.)
8. Gerike P.B. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2017. #2. pp. 75-84. (Rus.)
9. Barkov A.V., Barkova N.A. Vibratsionnaya diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibratsii [Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis: Handbook]. St. Petersburg, 2004. p. 156 (Rus.)
10. Gerike P.B., Nikitin A.G., Tagil'tsev-Galet K.V. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2017. #2. pp. 100-109. (Rus.)
11. V. Pozhidaeva. Determining the roughness of contact surfaces of the rolling bearings by the method of shock pulses. World Tribology Congress III, September 12-16, 2005, Washington, D.C., USA (Eng.)
12. Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration. Journal of Mechanical Design. 2008. Vol. 130. pp. 121402/1 - 121402-13. DOI: 10.1115/1.2976803 (Eng.)
13. Kravchenko V.M., Sidorov V.A., Butsukin V.V. Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. 2013. #2. pp. 45-47. (Rus.)
14. Klishin V.I., Zvorygin L.V., Lebedev A.V., Savchenko A.V. Problemy bezopasnosti i novye tekhnologii podzemnoy razrabotki ugol'nykh mestorozhdeniy [Problems of safety and new technology of underground coal mining]. Novosibirsk, 2011. p. 524 (Rus.)
15. Eshcherkin P.V. Razrabotka metodiki diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya dizel'-gidravlicheskih burovnykh stankov [Development of the technique for diagnosis and prediction of technical condition of the diesel-hydraulic drilling rigs]: PhD thesis excerpt. Kemerovo. 2012. (Rus.)
16. Bently D.E., Hatch C.T. "Fundamentals of rotating machinery diagnostics", Bently Pressurized Press. 2002. p. 726 (Eng.)

Поступило в редакцию 13 июня 2017
Received 13 June 2017