

УДК 53.083(430.1)

**НОВОЕ В МЕТОДИКЕ ПРОВЕДЕНИЯ
ИСПЫТАНИЙ ЭНЕРГО-МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГОРНОЙ
ТЕХНИКИ**

**NEW IN THE TESTING TECHNIQUE FOR POWER AND MECHANICAL
EQUIPMENT OF MINING MACHINES**

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

Gericke 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. В статье рассмотрены принципы реализации методологии использования единых диагностических критериев оценки фактического состояния сложных механических систем по параметрам генерируемой вибрации в рамках разработки методики проведения испытаний образцов горно-шахтного оборудования. Обоснована эффективность применения результатов комплексного диагностического подхода для оценки состояния энерго-механического оборудования горных машин. Доказано, что только широкое использование современных методов вибрационной диагностики предоставляет возможность для своевременного выявления дефектов оборудования, вне зависимости от их типа и степени опасности; обосновано конкретное сочетание методов неразрушающего контроля, необходимых для осуществления комплексного диагностического контроля. Обоснована эффективность разработанного комплекса из более чем 120 диагностических правил, пригодных для выполнения автоматизированного анализа виброакустического сигнала и выявления основных повреждений энерго-механического оборудования на базе селективных групп информативных частот. Показано, что создаваемые единые диагностические критерии оценки технического состояния могут быть использованы для совершенствования методологии нормирования параметров механических колебаний и осуществления краткосрочного адаптивного прогнозирования процессов деградации технического состояния горно-шахтного оборудования. Результатами исследований установлено необходимость перехода ремонтных и обслуживающих подразделений промышленных предприятий на систему обслуживания техники по её фактическому техническому состоянию, платформой для реализации базовых элементов которой может послужить разработанный комплекс диагностических правил выявления дефектов. Обоснована принципиальная состоятельность разрабатываемой методологии проведения испытаний оборудования горных машин, реализация основных принципов которой позволит повысить надежность горной техники и минимизировать количество аварийных отказов сложных механических систем.

Abstract. This article discusses the principles for implementing the methodology for using single diagnostic criteria for assessing the actual state of complex mechanical systems based on the generated vibration parameters, suitable for creating a test procedure for samples of mining equipment. The efficiency of applying the results of a complex diagnostic approach for assessing the state of mining equipment is substantiated. Only with the use of modern methods of vibration diagnostics it is possible to detect defects in equipment in a timely manner, regardless of their type and degree of danger. A concrete combination of the methods of nondestructive testing necessary for the implementation of complex diagnostic control is substantiated. The effectiveness of the developed complex of more than 120 diagnostic rules suitable for performing automated analysis of the parameters of the vibro-acoustic signal and detection of equipment defects on the basis of selective groups of informative frequencies is substantiated. It is shown that the developed united diagnostic criteria for assessing the technical state can be used to improve the methodology for standardization of parameters of mechanical vibration and for implementation of short-term adaptive forecasting of the degradation of the technical condition of mining equipment. The results of the research categorically proved the need for the transition of repair and maintenance departments of industrial enterprises to the system of maintenance of machinery based on its actual technical condition, a platform for the implementation of basic elements of which can serve as a developed set of

diagnostic rules for the detection of defects. The principal validity of the developed methodology for testing equipment of mining machines is substantiated, the implementation of the basic principles of which will increase the reliability of mining equipment and minimize emergency failures of complex mechanical systems.

Ключевые слова: вибродиагностика, горно-шахтное оборудование, методика испытаний, остаточный ресурс, нормирование параметров механических колебаний.

Keywords: vibration analysis, mining equipment, methodical bases of tests, residual service life, the valuation of parameters of mechanical vibrations.

Совершенствование методологии анализа параметров вибрационных, ультразвуковых, тепловых и других типов физических волн, несущих полезную диагностическую информацию, сделало возможным ускорение эволюции средств и методов проведения неразрушающего контроля. Поэтому именно сегодня приобретает актуальность задача создания современной методики проведения испытаний узлов горно-шахтного оборудования для определения основных показателей их работоспособности, в основу которой положены принципы реализации единых диагностических критериев и прогнозного математического моделирования процессов изменения состояния металлоконструкций и энерго-механического оборудования горных машин.

Алгоритм реализации разрабатываемой методики включает в себя четыре основных этапа – анализ документации, разработку программы функциональной диагностики и экспертного обследования, экспертное обследование объекта испытаний, разработку рекомендаций по применению методов восстановления работоспособности ГШО и расчет прогноза безаварийной работы объекта испытаний.

Внедрение в методику проведения испытаний такого элемента системы обслуживания техники по её фактическому состоянию, как математическое прогнозное моделирование, делает её экономически привлекательной для реализации в условиях работы промышленных предприятий ТЭК России.

Основные причины отсутствия универсального комплексного критерия, пригодного для выполнения оценки технического состояния горных машин по параметрам генерируемой ими вибрации, заключаются в недостаточной изученности вопросов динамики сложных механических систем, слабой проработке существующих прогнозных моделей и ограниченных возможностях практического применения критериев предельного состояния, разработанных для относительно небольшой группы горной техники [1, 2]. Создание эффективных критериев предельного состояния диагностируемого оборудования и разработка адекватных математических моделей развития дефектов невозможно без детального изучения определяющих взаимосвязей между изменением параметров механических колебаний и фактическим состоянием энерго-механического оборудования горных машин [3, 4]. Решение задач, поставленных в рамках настоящей работы, является

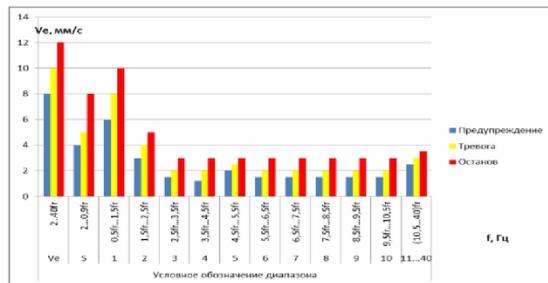
необходимым условием создания эффективной современной методологии проведения испытаний горных машин, включающей элементы прогнозного математического моделирования процессов изменения фактического состояния сложных механических систем.

В ходе выполнения цикла исследований по изучению особенностей формирования и распространения вибрационных волн, содержащих признаки наличия дефектов оборудования горных машин, была осуществлена формализация более 120 базовых диагностических признаков в области вибродиагностики. Результаты проведенной формализации позволили разработать комплекс диагностических правил, пригодных для детектирования семи основных групп дефектов энерго-механического оборудования, среди которых – нарушение жесткости системы, нарушение соосности валов агрегатов, неуравновешенность вращающихся деталей, дефекты подшипников качения, повреждения зубчатых передач, дефекты соединительных муфт и дефекты электрической природы. До 80% от общего числа разработанных правил выявления дефектов основаны на результатах спектрального анализа, оставшиеся 20% относятся к результатам формализации принципов выделения огибающей, анализа характеристики выбега, метода ударных импульсов и вейвлет-преобразования исходных диагностических данных.

Именно такое комплексное использование результатов анализа параметров вибрационных волн, полученных при реализации нескольких различных диагностических подходов (конкретное сочетание которых зависит от особенностей конструкции объекта испытаний и режимов его работы) как нельзя лучше подходит для выявления критериев предельного состояния техники, а также для разработки единых диагностических критериев (ЕДК) оценки и прогнозирования процесса изменения фактического состояния элементов сложных механических систем. Результаты проведенных исследований позволили предложить уникальные единые диагностические критерии для каждого элемента конструкции энерго-механического оборудования горных машин, разработанные на основе результатов комплексного анализа исходных диагностических данных.

Доказано [3, 5], что в условиях действующей сегодня на промышленных предприятиях России системы планово-предупредительных ремонтов с максимальной эффективностью могут быть реали-

зованы экспоненциальные аддитивные краткосрочные прогнозные модели, т.к. все сроки проведения обслуживания четко регламентированы и наибольшую ценность представляет информация о возможности безаварийной работы техники до момента проведения очередного обслуживания или ремонта. Аддитивность прогнозных моделей



А) Электродвигатели подъемной лебедки
экскаватора ЭШ 10/70.

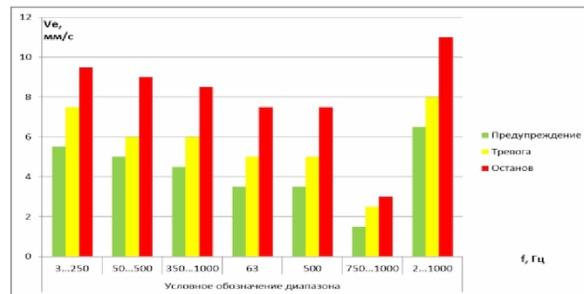
Рис. 1. Пример нормирования спектрального состава вибрационных волн, генерируемых при работе энерго-механического оборудования горных машин.

такого типа основывается на их способности изменяться, приспосабливаясь к результатам последних диагностических данных. Использование в рамках разрабатываемой методологии проведения испытаний горной техники математических моделей для прогнозирования изменения технического состояния создает принципиально новые возможности для обеспечения безаварийной эксплуатации технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах, а также открывает инновационный путь к совершенствованию существующих методик нормирования параметров механических колебаний, генерируемых при работе энерго-механического оборудования объектов исследования [6].

Уникальность предлагаемой модели заключается в том, что впервые в качестве моделируемых параметров выступает не общий уровень вибрационного сигнала или уровни отдельных составляющих спектра, а совокупность единых диагностических критериев, разрабатываемых по количеству предполагаемых типов дефектов энергомеханического оборудования; причем данная модель предусматривает возможность построения прогноза изменения состояния сложных механических систем, в состав которых входят самые разные по типу и конструкции узлы и агрегаты горной техники.

Совершенствование методологии нормирования параметров механических колебаний (в частности, разработка индивидуальных спектральных масок высокой степени детализации для широкого спектра горной техники) открывает перспективное направление для развития существующих аддитивных прогнозных моделей, используемых для описания и прогнозирования изменения параметров, характеризующих состояние сложных механических систем. Метод спектральных масок ос-

нован на сегментировании всего диапазона измерений на несколько частотных полос, параметры каждой из которых рассчитываются исходя из числа предполагаемых групп дефектов энергомеханического оборудования, степени опасности их развития и специфики диагностических признаков. При этом полосы могут как перекрывать,



Б) Редуктор подъемной лебедки экскаватора
ЭШ 10/70.

так и не перекрывать друг друга в частотной плоскости, это зависит от степени детализации маски, а также от конструктивных и кинематических особенностей диагностируемых агрегатов (см. пример на рисунке 1). Для каждой частотной полосы должны быть установлены свои индивидуальные предельные допустимые значения параметров вибрации. Это правило относится к высоко- и низкоэнергетическим составляющим спектра, зубцовыми частотам и интервалу общего нарушения жесткости, и применяется ко всему частотному диапазону (обычно, стандартный диапазон для проведения измерений на горном оборудовании принимается равным 2-1000 Гц, расширенный – до 7000 Гц). В качестве нормируемого параметра вибрации здесь, как правило, принимают значение виброскорости, как наиболее информативное в рассматриваемом диапазоне частот. Однако, иногда эффективным может оказаться нормирование частотных диапазонов вибрационных сигналов по параметрам виброускорения или виброподвижения [7, 8].

Данному методу нормирования присущи два основных недостатка – большие затраты времени и труда на сбор статистической информации по однотипным объектам диагностирования, необходимой для разработки критериев для построения масок. Кроме того, при любом изменении конструкции агрегата, а тем более при смене типа объекта диагностирования работу по созданию спектральных масок необходимо начинать заново. Помимо прочего, частотные признаки наличия дефектов различной природы могут перекрывать друг друга, кроме того, могут совпадать и отдельные гармоники вплоть до 0,1 Гц, что значительно усложняет проводимый анализ и объясняется особенностями кинематики механизмов, типом и

степенью развития повреждений. Именно поэтому расположение полос спектральных масок энерго-механического оборудования горных машин необходимо выбирать с учетом их взаимного перекрытия.

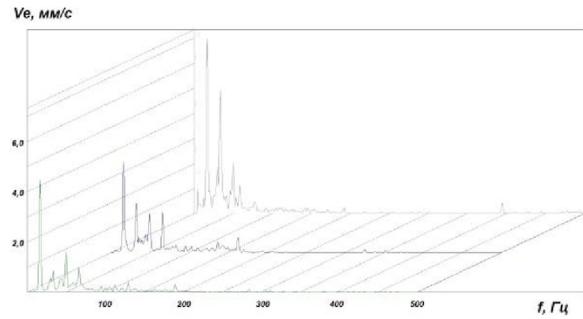
В рамках данного исследования для решения задачи совершенствования методологии нормирования параметров механических колебаний и разработки индивидуальных спектральных масок были обобщены результаты замеров вибрации, полученные в ходе полных диагностических обследований выборки, состоящей из 30 единиц экскаваторов типа ЭШ, 25 экскаваторов ЭКГ, 5 дизель-гидравлических буровых установок и 50 единиц дробильно-сортировочного оборудования. Периодичность обследования оборудования составила один раз в год или один раз в два года, полный период проведения измерений с использованием данной выборки составил 13 лет (с 2004 по 2016 годы). Спектральные маски были разработаны для всего основного энерго-механического оборудования горных машин, представленных в

данной выборке, в частности, для широкого модельного ряда карьерных экскаваторов типа ЭШ и ЭКГ.

Доказано [9, 10], что необходимый и достаточный для анализа минимум диагностической информации, практически полностью характеризующий фактическое состояние любой сложной механической системы, может быть получен с помощью анализа ряда основных параметров виброакустического сигнала. Таким образом, в качестве основных критериев предельного состояния эффективным может оказаться использование одного или сразу нескольких из следующих основных информативных показателей, приведенных ниже:

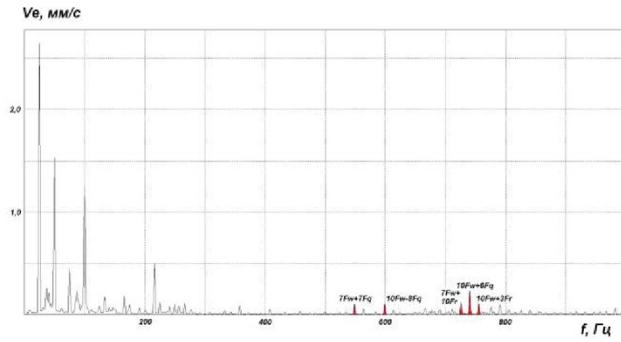
- общий уровень СКЗ виброскорости и виброускорения в стандартном и расширенном частотных диапазонах;
- максимумы амплитуд подшипниковых и зубчатых частот по параметрам виброскорости и/или виброускорения в расширенном частотном

А)



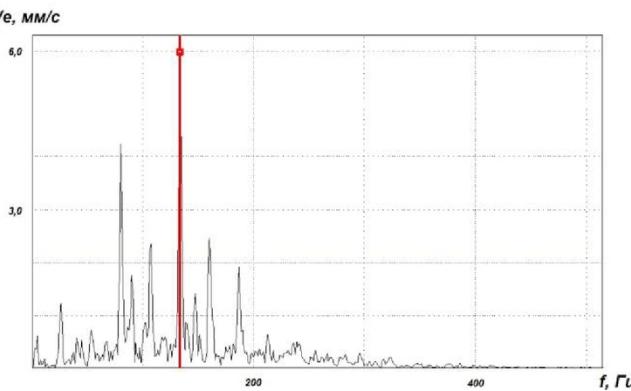
*Флуктуация амплитуд значащих гармоник и уровня шумов при нарушении жесткости системы.
Генератор подъема экскаватора ЭШ 13/50.*

Б)



Множественные дефекты подшипника генератора собственных нужд малой генераторной группы экскаватора ЭШ 10/70.

В)



Основной диагностический признак развития абразивного износа зубчатых зацеплений редуктора тяговой лебедки экскаватора ЭШ 20/90.

Рис. 2. Некоторые примеры диагностических признаков развития дефектов энерго-механического оборудования экскаваторов типа драглайн.

диапазоне (10...10000 Гц);

- частотные полосы, ряды или отдельные гармоники, свидетельствующие о наличии повреждений однотипного характера (например, гармонические ряды нарушения жесткости системы [0,4f_R...24 f_{Rmax}], дефекты соединительных муфт n_{fR}, расцентровка двигателя с редуктором [f_R...4...6f_R] и т.д. [11]);

- размах виброперемещения в диапазоне 10...1000 Гц;

- СКЗ виброскорости в октавной полосе частот, включающей в себя частоту вращения ротора [10, 11, 12].

Пример совершенствования методологии нормирования иллюстрирует представленный алгоритм сегментации стандартного частотного диапазона по параметру виброскорости. Расчетная ширина некоторых базовых полос спектральных масок (см. рисунок 1) для электродвигателей и редукторов подъемных, тяговых лебедок и механизмов поворота экскаваторов типа драглайн составит:

- для измерений на электродвигателях (см. рисунок 2):

1. 15...28 Гц дисбаланс ротора (f_{Rmin}...max);

2. 15...100 Гц расцентровка двигателя с редуктором (f_R...4...6f_R);

3. 450...750 Гц частота муфты (n f_R);

4. 5...300 уровень низкочастотного шума, сопровождающий нарушение жесткости опорной системы;

5. 6...600 Гц (0,4f_R...24 f_{Rmax}) нарушение жесткости, структурный резонанс;

6. 300...1000 Гц общий частотный диапазон для дефектов подшипников;

7. 50...500 Гц kf_{ЭЛ} гармонический ряд частоты питающей сети.

- для измерений на редукторах переборного типа (см. рисунок 3):

1. 2...250 Гц нарушение соосности, перекос валов (kf_{R1}±kf_{R2}, kf_{R1}*kf_{R2});

2. 50...500 Гц дефекты зубчатых зацеплений 2 степени (mfz±nf_{R2}; mf_M±nf_{R2});

3. 350...1000 Гц дефекты зубчатых зацеплений 1 ступени (mfz±nf_{R1}; mf_M±nf_{R1});

4. 63,12±5 Гц и 499,8 ± 5 Гц постоянная погрешность шага зацепления 1 и 2 ступени соответственно (f_{z1} и f_{z2});

5. Флуктуация амплитуд, увеличение уровня шума 50...1000 Гц свидетельствует о необратимых процессах разрушения зубчатых колес – питтинге и формировании трещин в зубьях (mfz±nf_{R1,2}; mf_M±nf_{R1,2});

6. 750...1000 Гц базовый диапазон для детектирования подшипниковых частот.

7. 2...1000 стандартный диапазон для проведения нормирования по общему уровню.

Для решения задач моделирования процессов вибрационной активности, формирующихся при работе энерго-механического оборудования гор-

ных машин, необходимо осуществить прогнозирование изменения с течением времени величин единых диагностических критериев, основанных на анализе характеристик групп информативных частот, что является не в пример более сложной задачей по сравнению с прогнозированием изменения величины общего уровня виброакустического сигнала [12]. Необходимым условием решения задачи по оценке остаточного ресурса механических систем является наличие эффективных способов выделения трендов детерминированной составляющей сигналов для выполнения кратко- и среднесрочного прогнозирования изменения технического состояния объекта [13, 14].

Единый диагностический критерий, наилучшим образом подходящий для выполнения оценки состояния однотипных объектов, может быть разработан с применением многомерного пространства диагностических признаков при помощи алгоритмов скаляризации [3], причем минимальное потребное для анализа количество таких критериев должно равняться числу групп основных дефектов (например, свой уникальный единый критерий для дефектов подшипников, для нарушения центровки, нарушения жесткости системы, дефектов соединительных муфт, дефектов зубчатых передач в составе редукторов и т.д.).

Задача разработки ЕДК для каждого из типов дефектов энерго-механического оборудования горных машин включает в себя реализацию процедуры клиппирования, т.е. удаление из спектра всех «лишних» гармонических составляющих, возбуждаемых в результате действия сил, имеющих другую природу по сравнению с рассматриваемой группой дефектов. Алгоритмы выделения групп информативных гармоник, содержащих информацию о наличии дефектов подшипников качения, зубчатых передач, соединительных муфт, центровки валов и т.п. должны быть основаны на удалении из спектра всех прочих составляющих [15]. Таким образом, число реализуемых алгоритмов клиппирования должно равняться количеству потенциально возможных дефектов исследуемого оборудования.

Кроме того, алгоритм создания ЕДК должен включать в себя реализацию еще одной процедуры – уточнение оборотной частоты вращения вала. Данная процедура основана на принципе поиска и выделения составляющих спектра с максимальными амплитудами в низкочастотном диапазоне, причем на сегодняшний день разработано большое число таких процедур [3, 5, 7], отличающихся принципами выявления возможных оборотных (не всегда совпадающих с максимальными выраженным гармониками). В настоящей работе использовалась программа расчета, разработанная в рамках исследования [3], как зарекомендовавшая себя высокой степенью достоверности получаемых результатов при работе со спектрами виброскорости и виброподъема подшипников

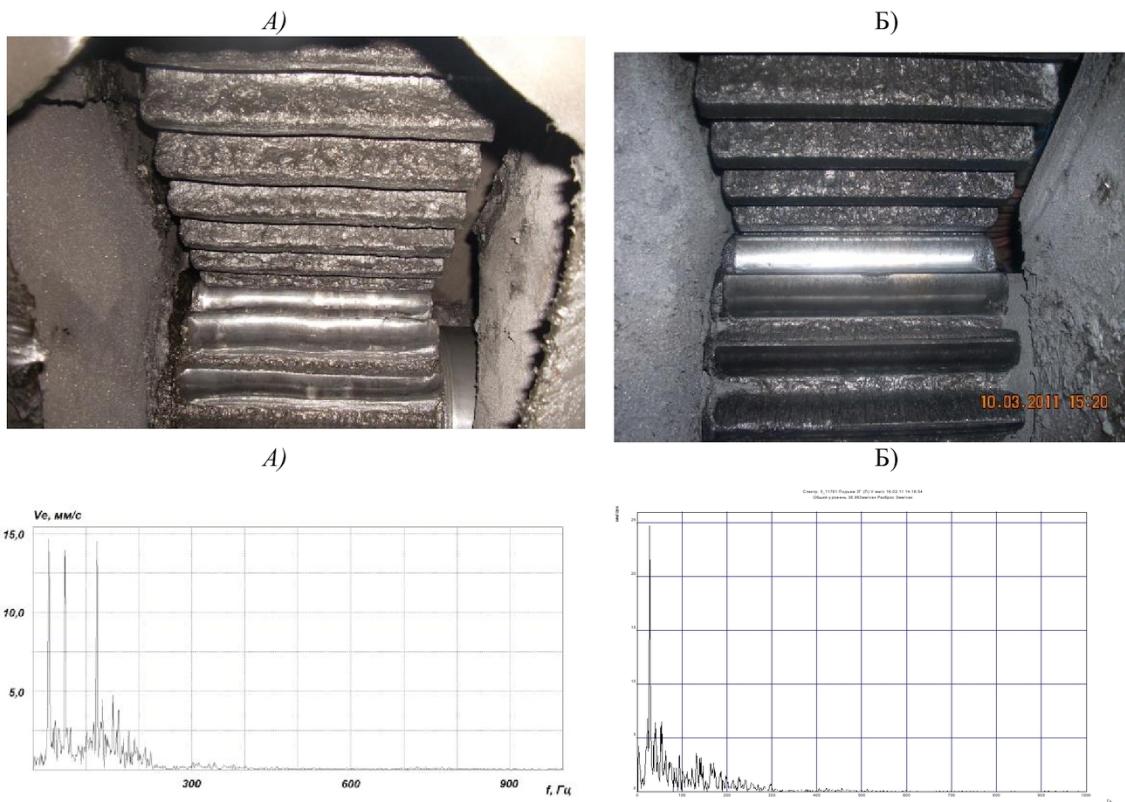


Рис. 3. Примеры диагностических признаков наличия развитых дефектов зубчатых передач.

A) Абразивный износ зубчатых зацеплений открытой зубчатой передачи и недопустимый уровень расцентровки редуктора с открытой передачей подъемной лебедки экскаватора ЭКГ-5А
Б) Питтинг зубьев вал-шестерни подъемной лебедки ЭКГ-5А

качения, где максимальные амплитуды значащих гармоник априори могут не принадлежать оборотной частоте.

Результаты выполненных ранее исследований [8, 10] позволили сформулировать комплекс базовых диагностических признаков оценки состояния зубчатых передач по параметрам вибрации, пригодный для разработки ЕДК для диагностики редукторов переборного типа, наиболее распространенных в конструкции горного и обогатительного оборудования, в основу которого положены результаты анализа следующих базовых информативных параметров:

1. Оценка нормированного общего уровня и пикового значения виброускорения в диапазоне 50...10 000 Гц;

2. Общий уровень составляющих зубчатых частот по параметру виброскорости (2...3000 Гц);

3. Глубина модуляции спектра огибающей вибросигнала в диапазоне $0,5f_{Z_{min}} \dots 20f_{Z_{max}}$ Гц (где $f_{Z_{min}}$ и $f_{Z_{max}}$ – соответственно, минимальная и максимальная по частоте гармоника любой из базовых зубцовых частот);

4. Общий уровень виброскорости в низкочастотном диапазоне (5 Гц ... $15f_{R_1}$), содержащий признаки наличия несосности и/или изгиба валов, неуравновешенности элементов редуктора, нарушения жесткости системы.

5. Флуктуация амплитуд гармоник базовых kf_R , $mf_Z \pm nf_{R1,2}$ и промежуточных модуляционных частот f_M и $f_M \pm nf_{R1,2}$, указывающая на степень развития повреждения зубчатой пары.

6. Мера подобия, определяемая по результатам сравнения вейвлет-преобразования и временной волны реального и «эталонного» сигналов.

Таким образом, полученные научные результаты позволяют осуществить разработку качественно новой методики проведения испытаний горной техники, основанной на принципах реализации комплексного диагностического подхода и прогнозирования процесса изменения состояния сложных механических систем с использованием подходов адаптивного краткосрочного моделирования и разрабатываемых единых диагностических критериев.

Выполненные исследования в области изучения процессов формирования, развития и особенностей распространения механических колебаний впервые позволили полностью формализовать правила оценки изменения спектрального состава полигармонических волн, генерируемых при работе энерго-механического оборудования горных машин.

Результаты работы доказали принципиальную состоятельность предложенного направления совершенствования методологии нормирования параметров механических колебаний и эффектив-

ность разрабатываемых единых диагностических критериев для оценки и прогнозирования изменения фактического состояния сложных механических систем, что открывает дополнительные пер-

спективы для повышения надежности эксплуатируемой техники и минимизации аварийных отказов и непроизводительных простоев горношахтного оборудования.

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. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. / Иркутск: Издательство ИрГТУ, 1999. – 230 с.
8. Герике П. Б. Оценка технического состояния мультипликаторов компрессоров по параметрам механических колебаний /Герике Б.Л., Герике П.Б./Вибрация машин: измерение, снижение, защита, № 3. – Донецк. – 2008. – С. 23-26.
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. Основы динамической диагностики машинных агрегатов горного оборудования /Герике П.Б., Герике Б.Л., Шахманов В.Н./Горный информационно-аналитический бюллетень, №3. – Москва. – 2011. – С. 367 – 377.
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. 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.
14. Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков. Ещеркин П.В., автореферат докторской диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово – 2012 год. – 18 с.
15. 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 programmnogo obespecheniya dlya avtomatizirovannoy diagnostiki slozhnykh system [Development special mathematical and software 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. 828 p. (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. Luk'yanov A.V. Klassifikator vibrodiagnosticheskikh priznakov defektov rotornykh mashin [The classifier of vibrodiagnostic symptoms of defects rotary machines]. Irkutsk, 1999. – 230 p. (rus)
8. Gericke P.B., Gericke B.L. Vibratsiya mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita. 2008. #3. Pp. 23-26. (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. 156 p. (rus)
10. Gericke P.B. Gerike B.L., Shakhmanov V.N. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2011. #3. Pp. 367-377 (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. Klishin V.I., Zvorygin L.V., Lebedev A.V., Savchenko A.V. Problemy bezopasnosti i novye tekhnologii podzemnoy razrabotki ugor'nykh mestorozhdeniy [Problems of safety and new technology of underground coal mining]. Novosibirsk, 2011. 524 p. (rus)
14. Eshcherkin P.V. Razrabotka metodiki diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya dizel'-gidravlicheskih burovых stankov [Development of a technique of diagnosis and prediction of technical condition of the diesel-hydraulic drilling rigs]: PhD thesis excerpt. Kemerovo. 2012. (rus)
15. Bently D.E., Hatch C.T. "Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics", Bently Pressurized Press. 2002. 726 p. (eng)

Поступило в редакцию 19.05.2017
Received 19 May 2017