

ВЫЯВЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГО-МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРОВ ТИПА ДРАГЛАЙН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Герике П. Б.

В статье приведены результаты анализа виброакустических характеристик, формирующихся при работе оборудования экскаваторов типа драглайн и классификация дефектов их энерго-механического оборудования, на базе которой обосновывается использование методов виброанализа и неразрушающего контроля. Проведенные исследования позволили создать комплекс из более чем 60 диагностических правил для автоматизированного выявления основных повреждений оборудования на основе селективных групп предупреждающих частот для систем интеллектуального обслуживания горных машин. Обоснована эффективность применения комплексного диагностического подхода для оценки технического состояния механизмов по параметрам генерируемой ими вибрации. Показано, что только с широким использованием современных методов вибрационной диагностики и неразрушающего контроля предоставляется возможность своевременного выявления дефектов агрегатов карьерных экскаваторов. Выполненные исследования позволили выявить основные закономерности изменения технического состояния динамического оборудования экскаваторов типа драглайн по результатам анализа параметров механических колебаний. Результаты проведенных исследований безапелляционно доказывают необходимость перехода ремонтных и обслуживающих подразделений промышленных предприятий на систему обслуживания техники по её фактическому техническому состоянию, платформой для реализации базовых элементов концепции которой послужит разработанный комплекс диагностических правил выявления дефектов по результатам анализа параметров механических колебаний. **Ключевые слова:** вибродиагностика; карьерный экскаватор; энерго-механическое оборудование; спектральный анализ; управление техническим обслуживанием.

В настоящее время на базе Института угля Сибирского отделения РАН осуществляется цикл исследований по определению предельных характеристик допустимого состояния экскаваторного парка Кузбасса, созданию математических моделей развития типовых повреждений узлов и агрегатов горной техники, а также разработке специализированного комплекса диагностических правил для выявления дефектов уникального оборудования угольной промышленности. Для выполнения задач, сформулированных в настоящем исследовании, наилучшим образом подходит метод контроля по параметрам механических колебаний, как наиболее эффективный из всех существующих методов неразрушающего контроля и функциональной диагностики для выполнения оценки и прогнозирования изменения технического состояния динамических машинных агрегатов [1, 2, 3].

Поиск основных закономерностей изменения технического состояния оборудования

электрических карьерных экскаваторов по результатам анализа генерируемой при его работе вибрации и совершенствование на их основе подходов к нормированию параметров механических колебаний являются неотъемлемой составляющей данного исследования.

На примере анализа параметров виброакустических волн, формирующихся при работе энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов типа драглайн в настоящей работе рассмотрены вопросы совершенствования методологии нормирования параметров механических колебаний.

Автоматизированное выявление дефектов динамического оборудования с помощью так называемых «селективных групп информативных предупреждающих частот», применяемых в системах интеллектуального обслуживания горной техники, является наиболее перспективным направлением развития диагностических методов и систем контроля [4, 5]. Поиск основных закономерностей из-

менения технического состояния оборудования электрических карьерных экскаваторов потребует создания комплекса диагностических признаков и правил для выполнения анализа и совершенствования нормирования параметров вибрации, для чего необходимо рассмотреть всю совокупность признаков в области виброанализа отдельно для каждого из основных дефектов, соответствующих этому типу машинных агрегатов.

Так, например, динамическому оборудованию драглайнов присущи следующие основные типы дефектов: дисбаланс ротора электродвигателя/генератора; расцентровка валопровода в различных узлах и механизмах; дефекты подшипниковых узлов (перекосы, ослабления посадок, увеличение зазоров, износы беговых дорожек, тел качения и сепараторов, нарушение режима смазки); дефекты элементов соединительных муфт; износ зубчатых зацеплений, нарушение соосности и перекосы валов в редукторах; различные дефекты двигателей

электромагнитного происхождения (магнитная асимметрия якоря, перекося фаз, смещение в магнитном поле и т. д.); нарушение жесткости системы, структурный резонанс.

Типы диагностируемых неисправностей и дефектов энерго-механического оборудования идентичны для разных моделей драглайнов (ЭШ 6/45, ЭШ 13/50, ЭШ 10/70, ЭШ 20/90 и т. д.), однако соответствующие им характерные диагностические признаки могут существенно отличаться. Объяснение данного факта заключается в различной кинематике механизмов разных моделей карьерных шагающих экскаваторов, и вследствие этого частоты проявления дефектов энерго-механического оборудования могут быть различны.

Среди дефектов динамического оборудования карьерных экскаваторов – драглайнов наиболее всего распространено нарушение жесткости системы (рис. 1), в некоторых случаях можно наблюдать такое явление как структурный резонанс.

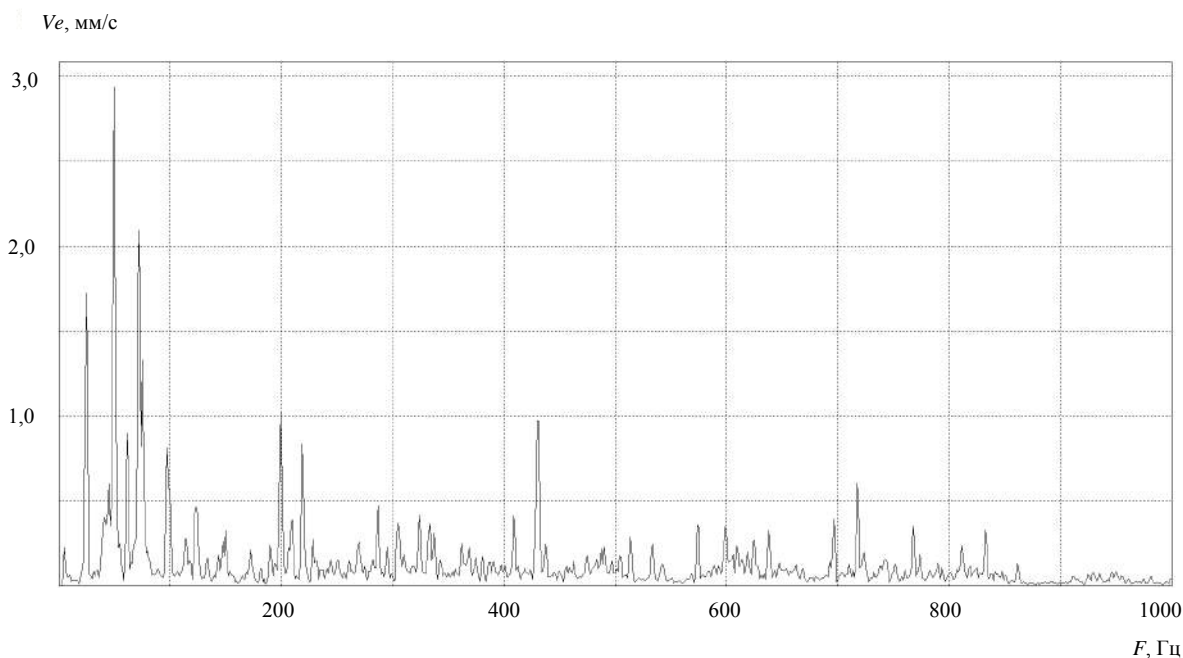


Рис. 1. Нарушение жесткости системы. Сетевой двигатель экскаватора ЭШ 11/70

На сегодняшний день формализовано более 16 признаков выявления нарушения жесткости при помощи методов контроля по параметрам механических колебаний (спектральный анализ, временная реализация, траектория движения ротора, контурная характеристика), абсолютное большинство кото-

рых сосредоточено в области спектрального анализа виброакустических характеристик [6]. На практике, в дополнение к результатам вибродиагностики, часто используют метод визуально-измерительного контроля, который предоставляет возможность быстро выявить дефекты крепежа узлов и агрегатов

горной техники. Такое сочетание методов неразрушающего контроля является очень эффективным для выявления дефектов этого типа, т. к. признаки нарушения жесткости системы в частотной плоскости часто численно совпадают с другими значащими гармониками, отвечающими за наличие повреждений совершенно иной природы (например, повреждения элементов соединительных муфт, нарушение соосности агрегатов или дефекты подшипников).

Очевидно, что только результаты комплексного анализа параметров полигармонической волны позволяют сформулировать искомую совокупность диагностических правил, в полной мере отвечающую адекватному представлению о наличии тех или иных дефектов динамического оборудования карьерных экскаваторов типа драглайн. Кроме того, многие процессы необходимо рассматривать в динамике их развития по причине значительной флуктуации амплитуд значащих гармоник.

Вопросы нормирования вклада отдельных спектральных составляющих, причина возникновения которых обусловлена наруше-

нием жесткости системы, в общий уровень виброакустического сигнала в настоящее время изучены недостаточно [7, 8]. Различные подходы к нормированию параметров механических колебаний либо оценивают, в основном, общий уровень сигнала в стандартной полосе частот, либо ориентированы на оценку довольно узких частотных полос спектра. Значащие гармоники могут изменяться не только по амплитуде, но и по частоте (это явление может быть вызвано изменением нагрузки, частоты питающей сети, частоты вращения и тому подобными причинами). Таким образом, становится очевидным, что подходы и методы нормирования параметров вибрации необходимо совершенствовать: осуществлять нормирование не только уровней в частотных полосах, но и большого числа отдельных составляющих спектра с учетом их флуктуации. Так, представленное на рис. 2 сравнение спектров иллюстрирует значительную флуктуацию амплитуд гармоник обратной частоты, а также уровня шумов при ослаблении крепежа генератора подъема экскаватора ЭШ 13/50.

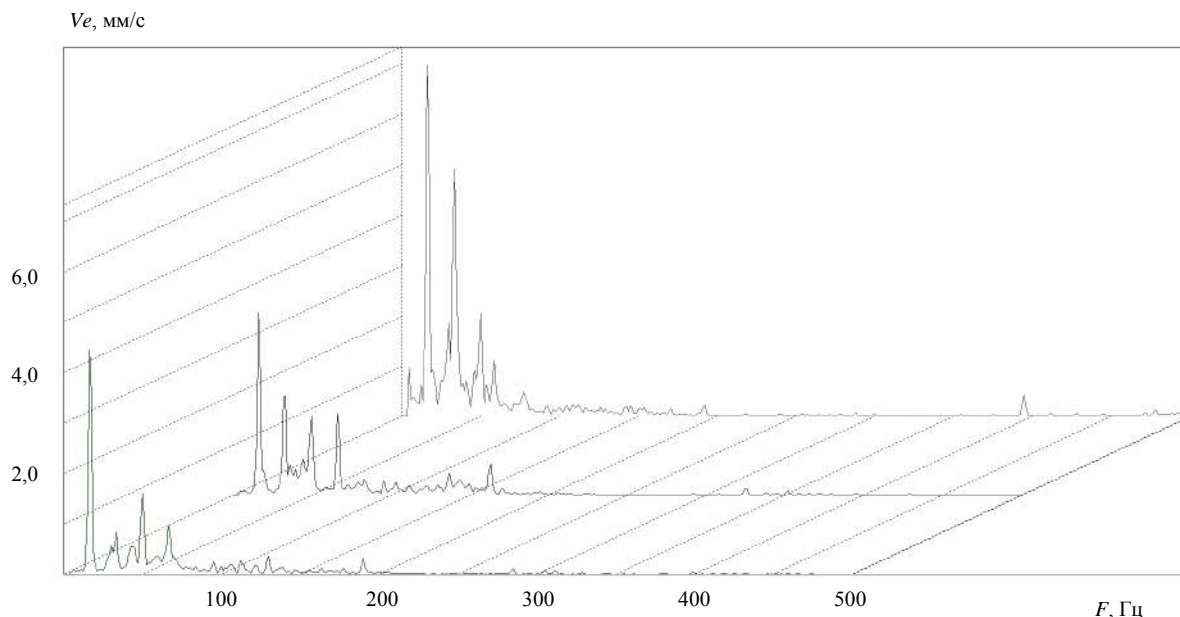


Рис. 2. Флуктуация амплитуд значащих гармоник и уровня шумов при нарушении жесткости системы

Индивидуальные спектральные маски, разработанные в рамках выполнения настоящего исследования для большого числа моделей одноковшовых карьерных экскаваторов,

обладают значительной степенью детализации и могут быть использованы для оценки технического состояния энерго-механического оборудования. Кроме того, с их помощью

могут быть определены момент изменения технического состояния сложной механической системы и главенствующая причина возникновения такого момента. Такая информация может быть очень полезна для выявления закономерностей изменения технического состояния динамического оборудования по результатам анализа параметров механических колебаний, однако главный недостаток такого подхода к нормированию вибрации заключается в некоторой затрудненности получения качественных адекватных результатов нормирования, вызываемой ограничениями, накладываемыми на область применения разработанных спектральных масок. Существует два основных типа таких ограничений. Во-первых, изменяющиеся при работе агрегата частоты проявления дефектов могут выходить за границы частотных полос спектральной маски, или же ширина этих полос должна выбираться чрезмерно большой, что сводит на нет информативность получаемых характеристик. Во-вторых, спектральные маски обладают высокой степенью индивидуализации и не могут быть унифицированы. Таким образом, при смене типа (или хотя бы марки, модели) диагностируемого оборудования работу по созданию масок необходимо начинать заново.

Кроме того, высоту полос спектральных масок необходимо выбирать с учетом флуктуации значащих гармоник, которая может достигать в некоторых случаях до 300 % от амплитуды гармоник базовой несущей частоты [9]. Таким образом, информативность индивидуальных частотных полос спектральных масок заметно падает, что не позволяет эффективно провести нормирование спектральных компонент. В этом случае при оценке параметров механических колебаний необходимо определить природу флуктуации, причину возникновения дефектов и степень их развития, что позволит пренебречь флуктуирующими составляющими при проведении дальнейшего анализа (по крайней мере, до определенной степени развития этого процесса). Если причиной флуктуации гармоник является нарушение жесткости опорной системы, такое как ослабление или отсутствие

внешнего крепежа агрегата, которое может быть установлено при помощи метода визуально-измерительного контроля (ВИК), то имеет смысл перед проведением полномасштабного вибродиагностического исследования по результатам проведенного ВИК установить состояние крепежа конструкции, что позволит значительно упростить дальнейший анализ параметров виброакустической волны, использовать высокоточные спектральные маски с индивидуальными границами частотных полос.

Таким образом, для осуществления эффективного выявления основных закономерностей изменения технического состояния машинных агрегатов по результатам анализа параметров механических колебаний, выполняемого на основе диагностики динамического оборудования экскаваторов типа драглайн, в рамках настоящего исследования предлагается использовать следующий алгоритм действий:

1. Оценка степени вклада отдельных составляющих спектра в общий уровень сигнала при помощи индивидуальных спектральных масок, разработанных для широкого типового и модельного ряда горной техники.

2. Использование комплексного диагностического подхода, состоящего как минимум из трех вибродиагностических методов (прямой спектральный анализ, анализ огибающей и эксцесс) и визуально-измерительного контроля.

3. Применение автоматизированного контроля, основанного на результатах обработки полигармонических волн с использованием более чем 60 диагностических правил для выявления базовых дефектов.

4. Разработка и внедрение единых диагностических критериев (ЕДК) для оценки и прогнозирования изменения параметров технического состояния сложного динамического оборудования.

Результаты автоматизированного контроля параметров вибрации наиболее эффективным образом могут быть использованы для выявления неисправностей и повреждений узлов и механизмов, работающих с по-

стоянными частотами вращения (например, дефекты генераторных групп экскаваторов-драглайнов, рис. 3).

Однако реализация и практическое применение алгоритмов автоматизированного контроля требует наличия представительных

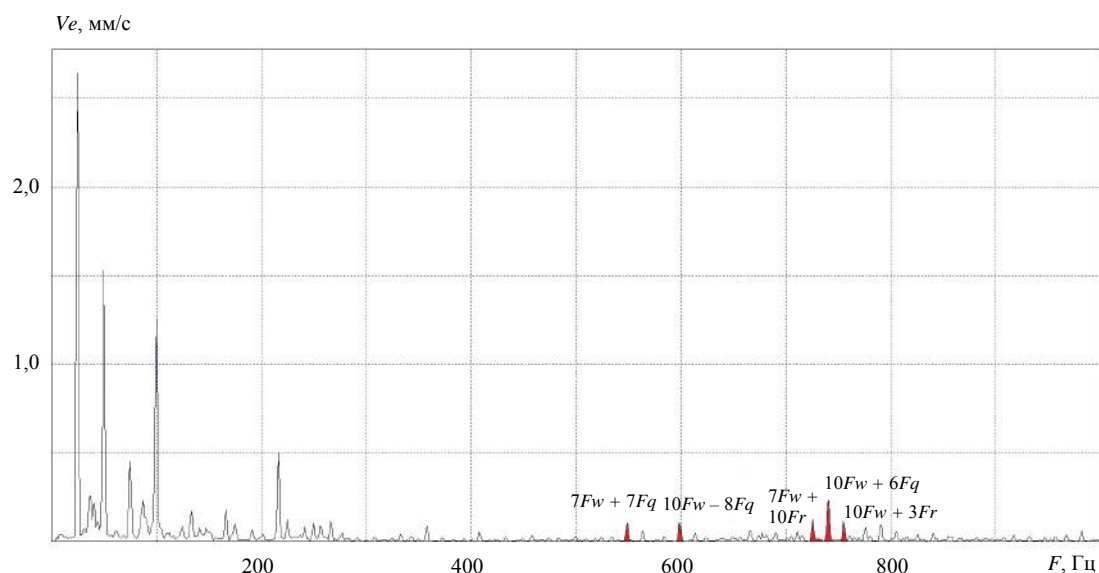


Рис. 3. Множественные дефекты подшипника генератора собственных нужд малой генераторной группы экскаватора ЭШ 10/70

баз данных по параметрам виброакустического сигнала и дефектам конкретного однотипного оборудования. Эффективность и точность данного метода, помимо прочего, сильно зависит от характера исследуемых полигармонических волн, точного соблюдения методологии сбора диагностических данных, наличия шумов и/или искажений исходного сигнала [10].

Так, спектр на рис. 3 иллюстрирует наличие множественных дефектов подшипника малой генераторной группы, выявленных при помощи автоматизированного контроля параметров виброакустической волны, основанного на применении разработанных в ходе выполнения настоящей работы диагностических правил (развитие трещины сепаратора и изменение формы тел качения подшипника).

Разработка универсальных ЕДК, пригодных для выполнения оценки технического состояния динамического оборудования по параметрам генерируемой при его работе вибрации является актуальной научной задачей. Набор диагностических критериев, необходимый для разработки ЕДК каждого из элементов конструкции экскаватора, будет уни-

кален из-за существенной ограниченности возможностей применения каждого из методов вибрационного анализа. Единый диагностический критерий, подходящий для оценки состояния идентичных объектов диагностирования, наиболее эффективно может быть описан в многомерном пространстве диагностических признаков с помощью алгоритмов скаляризации [11] при обязательном использовании принципа разделения объектов на различные группы, в зависимости от стадии развития присутствующих дефектов. Задача настоящего исследования усложняется тем, что таких критериев должно быть рассчитано несколько, по одному на каждую группу дефектов диагностируемого оборудования.

Если рассматривать весь комплекс динамического оборудования карьерных экскаваторов, то встает вопрос о необходимости разработки ЕДК для оценки и построения адекватного прогноза изменения технического состояния зубчатых передач редукторов переборного и планетарного типов, дефектов, связанных с искривлением валопровода и проявлениями дисбалансов (в том числе тепловых), дефектов соединительных муфт и

т. д. В настоящее время область применения существующих ЕДК ограничена, преимущественно, подшипниками качения, как наиболее изученным с точки зрения виброанализа элементом динамически работающих машинных агрегатов.

Для разработки ЕДК для каждого из дефектов, присущих энерго-механическому оборудованию горных машин, необходимо удалить из спектра «лишнюю» информацию обо всех физических явлениях иной природы, т. е. осуществить процедуру клиппирования. Результатом расчетов с использованием подходов адаптивного моделирования и единых диагностических критериев станет графиче-

ское представление математической прогнозной модели изменения технического состояния объекта, при помощи которой можно определить гарантированный минимальный период безаварийной работы агрегата и должным образом скорректировать ремонтные мероприятия.

Одним из основных типов неисправностей, оказывающих наиболее заметное влияние на характер вибрационной активности агрегата, являются повреждения зубчатых передач [12, 13] в составе редукторов подъемных и тяговых лебедок (рис. 4), а также механизмов поворота карьерных экскаваторов. Двадцать семь основных диагностических правил

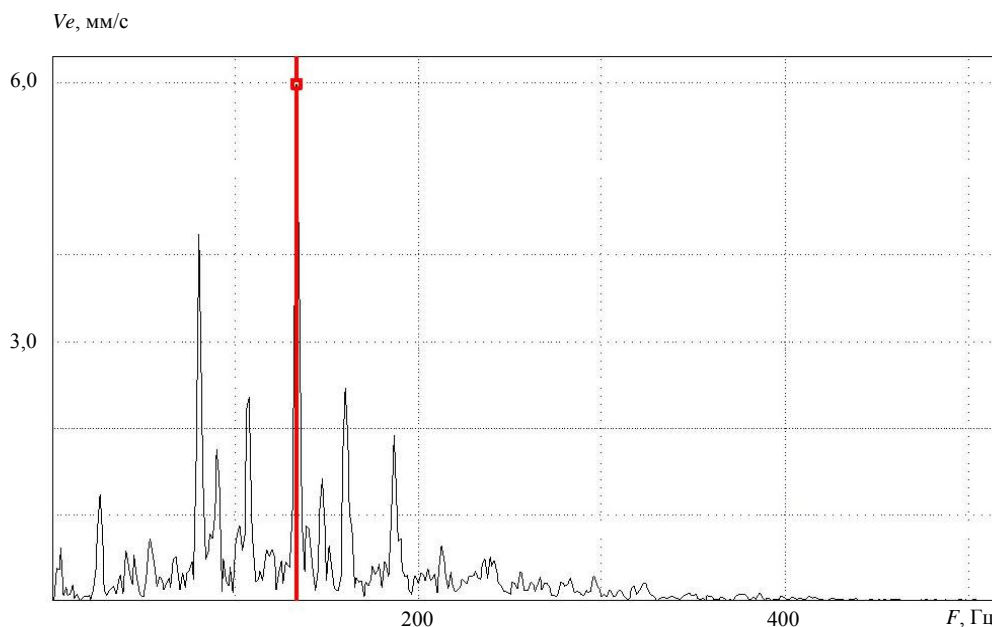


Рис. 4. Основной диагностический признак развития абразивного износа зубчатых зацеплений редуктора тяговой лебедки экскаватора ЭШ 20/90

выявления дефектов зубчатых передач по результатам анализа параметров вибрации в большинстве своём сосредоточены в области прямого частотного анализа. Интенсивное развитие абразивного износа зубчатых пар редукторов подъемной и тяговой лебедок экскаваторов типа драглайн нередко сочетается с нарушением соосности или перекосом валов в этих редукторах, что и является одной из основных причин возникновения дефектов зубчатых зацеплений, для эффективного обнаружения которых необходимо проводить детектирование модуляционных частот пересопряжения зубьев. Поскольку даже заведомо

исправная зубчатая пара обладает заметной виброактивностью, становится очевидным, что оценка степени развития повреждений является весьма актуальной задачей.

Наибольшие затруднения при анализе параметров вибрации зубчатых пар вызывают изменяющиеся в процессе работы оборудования информативные частоты [14]. Частоты проявления дефектов могут изменяться на сотни герц в зависимости от режима работы лебедок, выбранного положения командоконтроллера, момента проведения измерения, степени развития дефекта, изменения нагрузки (например, цикл подъема/опускания

ковша) и т. п., что крайне затрудняет использование автоматизированной диагностики подобных физических процессов. Существующее программное обеспечение для контроля дефектов зубчатых передач по параметрам вибрации (как отечественное, так и зарубежное) является крайне малоэффективным и в большинстве случаев не позволяет своевременно выявлять дефекты, присущие данному объекту диагностирования.

Результаты проведенных исследований позволили автору статьи разработать специализированный комплекс диагностических правил для выявления дефектов оборудования одноковшовых карьерных электрических экскаваторов по параметрам вибрации, для чего описано и формализовано более 60 признаков для диагностики шести основных групп дефектов, присущих рассматриваемому типу оборудования. Большинство диагностических признаков находится в области частотного анализа, что значительно упрощает разработку специализированного комплекса для оперативной оценки технического состояния машинных агрегатов. Формализации подверглись как признаки в области прямого спектрального анализа, так и результаты обработки параметров исходных виброакустических волн методами ударных импульсов, эксцесса, вейвлет-преобразова-

ния и кепстрального анализа. Кроме того, удалось разработать и сформулировать новые совокупности диагностических правил для автоматизированного анализа параметров сигнала. В настоящее время активно ведется работа над созданием прогностических моделей развития дефектов технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах, совершенствованием методологии нормирования параметров механических колебаний с использованием индивидуальных спектральных масок и разрабатываемых единых диагностических критериев оценки технического состояния.

Угольная промышленность является источником повышенной опасности, и, как следствие этого, безопасности проведения горных работ должно уделяться особое внимание [15]. Результаты настоящих исследований убедительно доказали, что только комплексный системный подход к применению современных диагностических методов предоставит возможность для создания базовой платформы системы обслуживания техники по её фактическому состоянию, что в свою очередь позволит повысить безопасность горных работ и полностью избежать несчастных случаев на производстве, причиной которых является недопустимое техническое состояние эксплуатируемых горных машин и оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Диагностика горных машин и оборудования: учеб. пособие / Б. Л. Герике [и др.]. М., 2012. 400 с.
2. Неразрушающий контроль: справ. в 7 тт. под ред. В. В. Клюева. Т. 7. Москва, 2005. 828 с.
3. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.
4. Ещеркин П. В. Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2012. 18 с.
5. Кравченко В. М., Сидоров В. А., Буцукин В. В. Повреждения подшипников качения в результате износа // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 2. С. 45–47.
6. Герике П. Б. Вибродиагностика оборудования угольной и горнорудной промышленности // Отд. вып. ГИАБ: Ин-т угля СО РАН. М.: Изд-во «Горная книга», 2013. № ОВ 6. С. 440–446.
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. Bently D. E., Hatch C. T. Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics. Bently Pressurized Press, 2002. P. 726.
9. Baldacchi F., Arghir M., Gaudillere S. 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. 2014. Düsseldorf, Germany.
10. Барков А. В., Баркова Н. А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2004. 156 с.
11. Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизиро-

ванной диагностики сложных систем: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИФИ, 2007. 170 с.

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. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М., 1996. 276 с.

14. Лукьянов А. В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. 230 с.

15. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений / В. И. Клишин [и др.]. Новосибирск, 2011. 524 с.

Герике Павел Борисович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории средств механизации отработки угольных пластов. 650065, г. Кемерово, пр-т Ленинградский, 10, Институт угля СО РАН. E-mail: am_besten@mail.ru