

ГОРНЫЕ МАШИНЫ

УДК 53.083(430.1)

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРАВИЛ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРОВ ТИПА ДРАГЛАЙН

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

Институт угля Сибирского отделения Российской академии наук, 650065, Россия, г. Кемерово,
Ленинградский проспект, 10

Аннотация. Рассмотрены результаты анализа вибрационных характеристик, формирующихся при работе динамического оборудования экскаваторов типа драглайн. На основе проведенных исследований создан комплекс из более чем 60 диагностических правил для автоматизированного выявления основных повреждений оборудования на базе селективных групп предупреждающих частот для систем интеллектуального обслуживания горных машин.

Приведена подробная классификация дефектов динамического оборудования карьерных экскаваторов, на основе которой обосновано использование конкретных методов вибродиагностики, наиболее подходящих для быстрого и высокоточного проведения автоматизированного контроля технического состояния объектов диагностирования.

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.

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, динамическое оборудование, спектральный анализ, прогностические системы обслуживания.

В Институте угля Сибирского отделения РАН в настоящее время проводятся исследования 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. Одним из основных факторов, оказывающих влияние на безопасность эксплуатируемого технологического оборудования, является его техническое состояние. Исследования автора настоящей работы показывают, что около 25% парка карьерных экскаваторов, эксплуатируемых на разрезах и карьерах Кузбасса, находится в недопустимом техническом состоянии, их работа сопряжена с постоянным риском возникновения аварийных ситуаций. Сделать работу предприятий максимально безопасной, минимизировать аварийные простои, повысить экономические показатели, оптимизировать логистику и склад-

ское хозяйство – вот основные задачи, остро стоящие сегодня перед угольной и горнорудной отраслями промышленности России.

На примере вибродиагностики технического состояния главных приводов экскаваторов типа драглайн (лебедок подъема и тяги, механизмов поворота, генераторных групп) в настоящей работе рассмотрены вопросы разработки предпосылок для создания специализированного комплекса диагностических правил выявления дефектов данного оборудования.

В мировой практике именно автоматическое выявление дефектов динамического оборудования при помощи так называемых «селективных групп предупреждающих частот» в системах интеллектуального обслуживания на базе ПК является наиболее перспективным направлением развития диагностических методов и систем обслуживания горной техники. Из всех методов неразрушающего контроля и функциональной диагностики для выполнения данной работы выбран именно метод контроля по параметрам механических колебаний,

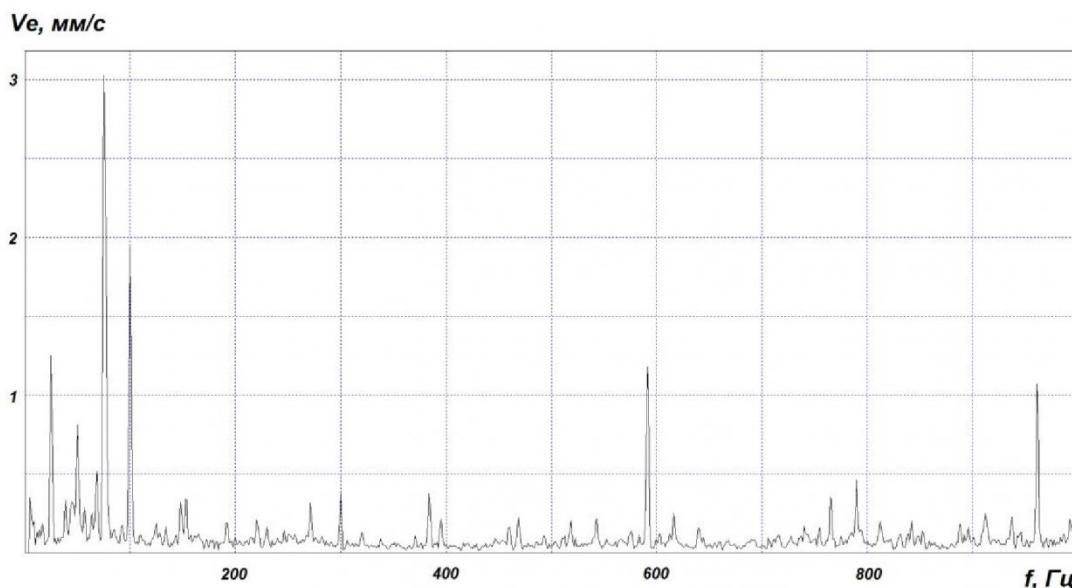


Рис. 1. Ярко выраженное нарушение жесткости системы генераторной группы экскаватора ЭШ 10/70.

как наиболее подходящий для оценки технического состояния динамических машинных агрегатов [1, 2, 3].

Для решения задачи создания комплекса диагностических правил для диагностики динамического оборудования экскаваторов типа драглайн необходимо рассмотреть необходимо всю совокупность признаков в области вибранализа отдельно для каждого из основных дефектов, соответствующих этому типу агрегатов.

Динамическому оборудованию драглайнов присущи следующие основные типы неисправностей и повреждений: дисбаланс ротора электродвигателя/генератора; расцентровка генераторных групп и электродвигателей с редукторами; дефекты подшипниковых узлов (перекосы, ослабление 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, перекос фаз, смещение в магнитном поле и т.д.); нарушение жесткости системы, структурный резонанс.

Дефекты динамического оборудования драглайнов идентичны, однако соответствующие им диагностические признаки в частотной области могут существенно отличаться. Это объясняется различной кинематикой механизмов некоторых моделей экскаваторов, и, как следствие, иными частотами проявления основных дефектов. Таким образом, диагностические правила для разных моделей карьерных шагающих экскаваторов, как правило, одинаковы, однако сами частоты проявления неисправностей и повреждений зачастую могут быть различны.

Самым распространенным дефектом горных машин в целом является нарушение жесткости системы, в некоторых случаях наблюдается явление структурного резонанса. На представленном ниже рисунке 1 приведен ярко выраженный пример описанной неисправности – ослабление крепления генераторной группы при частичном отсутствии крепежа её задней стороны.

На сегодняшний день формализовано более 16 признаков выявления нарушения жесткости методами контроля по параметрам механических колебаний [1, 2].

Признаки нарушения жесткости системы 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). Именно поэтому наряду с вибранализом на практике часто применяют метод визуально-измерительного контроля, который предоставляет возможность быстро выявить дефекты крепежа узлов и агрегатов горной техники. Однако, только результаты комплексного анализа параметров полигармонической волны позволяют сформулировать искомую совокупность диагностических правил, в полной мере отвечающих адекватному представлению о наличии тех или иных дефектов динамического оборудования карьерных экскаваторов типа драглайн.

Основным диагностическим признаком нарушение жесткости опорной системы считается наличие в спектре широкого гармонического ряда оборотной частоты f_R (до 12-16 порядка – см. рисунок 1), ярко проявляющего себя во всех плоскостях пространственного положения агрегата и сопровождаемого высоким уровнем низкочастотных шумов. Кроме того, очевидно, что данный процесс

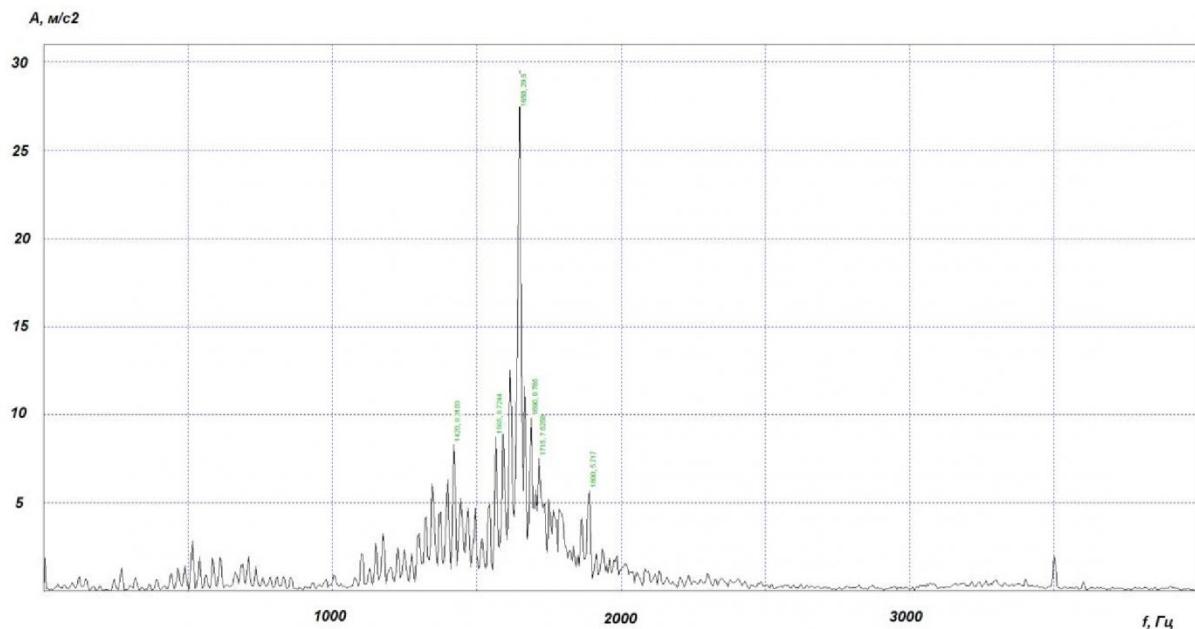


Рис. 2. Развитый дефект подшипника правого двигателя лебедки подъема экскаватора ЭШ 13/50.

необходимо рассматривать в динамике его развития по причине значительной флюктуации амплитуд значащих гармоник, из-за чего часто невозможно обойтись единичным замером параметров вибрации.

Одним из самых изученных в точки зрения вибранализа узлов в конструкциях горной техники являются подшипники качения, воспринимающие значительную часть статических и динамических усилий. Без претензий на полноту освещения ниже приведены основные методы контроля по параметрам механических колебаний, наилучшим образом подходящие для оценки их технического состояния: прямой спектральный анализ в расширенном частотном диапазоне, анализ спектра огибающей, метод ударных импульсов и эксцесс. На практике специалисты часто ограничиваются результатами спектрального анализа, иногда применяя эксцесс-обработку исходной волны, что вызвано ограниченным временем на проведение замеров в условиях работы на угольных разрезах.

Так, например, метод прямого спектрального анализа очень информативен, основная сложность здесь заключается в необходимости расчета групп «подшипниковых» частот (на рисунке 2 отмечены маркером). Зачастую подшипникам свойственно развитие сразу нескольких дефектов (как правило, это повреждение и наклеп сепаратора, изменение формы тел качения и повреждения колец), что несколько затрудняет проводимый анализ.

Обычно знание геометрии подшипника является необходимым условием проведения частотного анализа для выявления соответствующих дефектов. Поэтому на практике иногда применяют метод эксцесса, требующий лишь наличие информации о предполагаемом типе дефекта (дефект монтажа, эксплуатационный износ или зарожде-

ние повреждения) и частоте вращения вала, на котором насажен подшипник качения. Также эффективными могут оказаться результаты анализа по общему уровню виброускорения сигнала в расширенном частотном диапазоне или оценка степени вклада амплитуд отдельных гармоник в этот сигнал, не требующие проведения дополнительных громоздких расчетов [4]. Существует около шести основных диагностических правил выявления дефектов подшипников, некоторые из которых включают до 20 диагностических признаков, находящихся в основном именно в плоскости частотного анализа [1, 2, 4, 5].

Еще одной группой неисправностей, вносящей заметные изменения в параметры виброакустического сигнала, генерируемого при работе динамического оборудования драглайнов, являются повреждения зубчатых передач редукторов лебедок подъема и тяги, а также механизмов поворота. Основные сложности диагностирования их технического состояния обусловлены изменением при работе этих механизмов групп информативных частот. Значащие гармоники могут смещаться в процессе работы механизмов на десятки и сотни герц, поэтому автоматизированная диагностика подобных процессов крайне затруднена, существующее на рынке программное обеспечение контроля дефектов зубчатых передач по параметрам вибрации является малоэффективным и плохо справляется с поставленными задачами.

Существующие двадцать семь основных диагностических правил выявления дефектов зубчатых передач, таких как абразивный износ, выкрашивание (питтинг) и излом зубьев, в основном также сосредоточены в области частотного анализа. Так как даже исправная зубчатая пара обладает заметной виброактивностью, то становится оче-

видным, что оценка степени развития перечисленных повреждений является весьма актуальной задачей.

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. В этом случае необходимо проводить детектирование модуляционных частот пересопряжения зубьев, вычисляемых по соот-

ношениям вида $nf_m \pm kf_{r1(2)}$, $f_z = z_1 f_{r1} = z_2 f_{r2}$; $mf_z \pm kf_{r1}$, $mf_z \pm kf_{r2}$ (z_1, z_2 – число зубьев сопряженных шестерен; f_{r1}, f_{r2} – частоты вращения валов, на которые насажены

эти шестерни; k, m – натуральные числа; f_m – величина модуляции зубцовой частоты).

Кроме того, нельзя забывать о соединительных муфтах, используемых в конструкциях лебедок. Степень развития повреждений каждой из них можно оценить по величине вклада в общий уровень гармонической составляющей вида uf_R , где u – число элементов

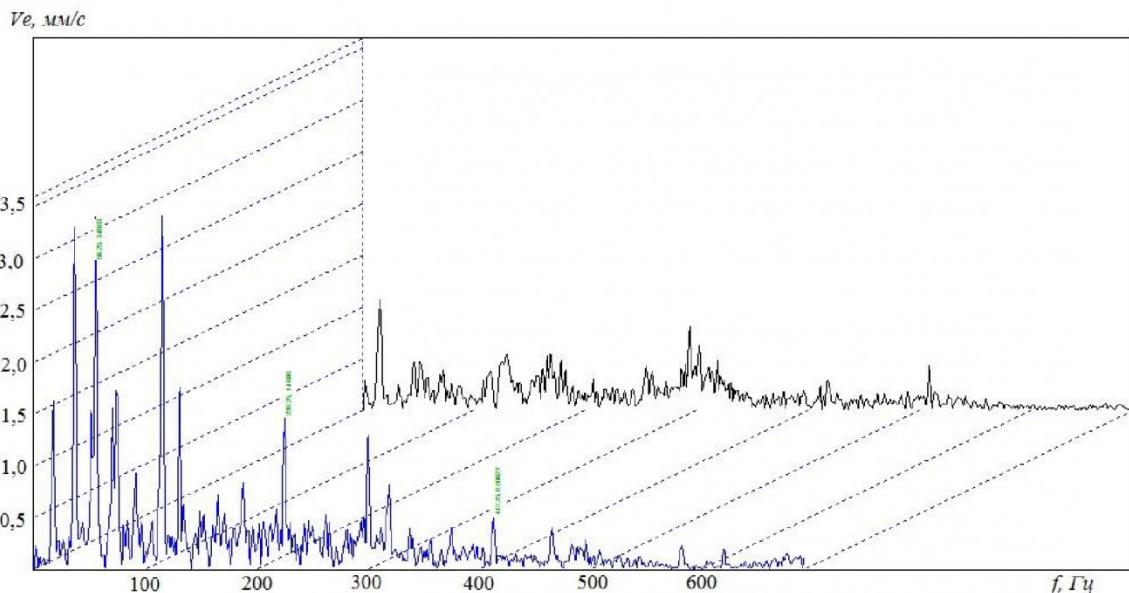


Рис. 3. Динамика развития абразивного износа зубчатых зацеплений быстроходного вала редуктора тяговой лебедки экскаватора ЭШ 10/70, период проведения измерений составляет 12 месяцев.

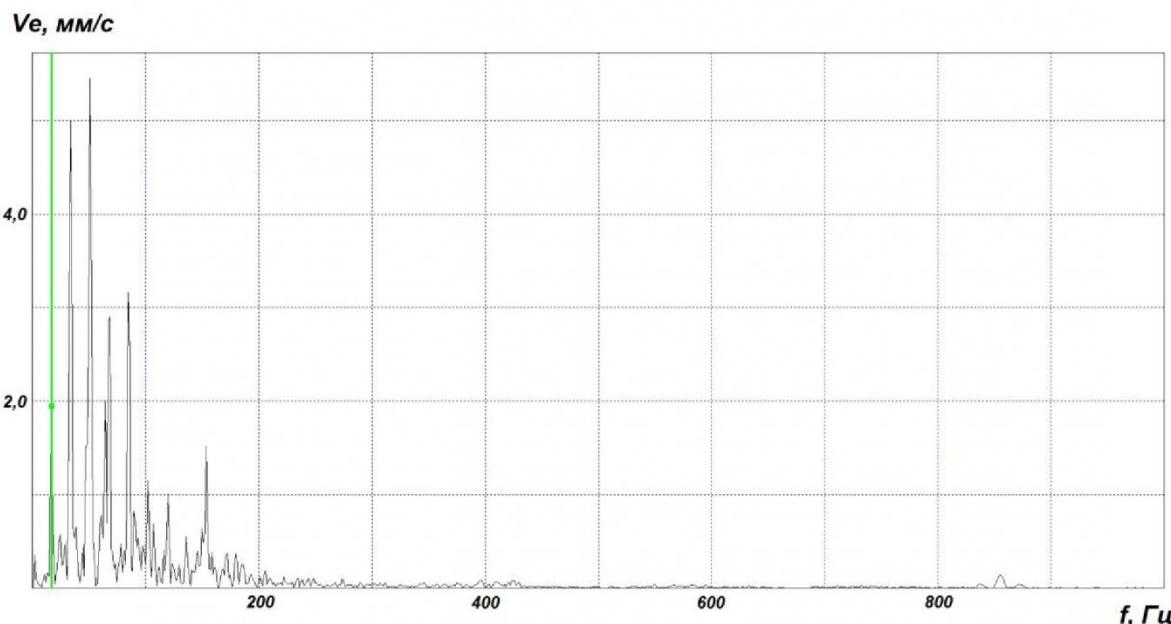


Рис. 4. Ярко выраженная расцентровка правого электродвигателя с редуктором подъемной лебедки экскаватора ЭШ 10/70, общее нарушение жесткости опорной системы.

муфты (лепестки, пальцы, пружины, пластины и т.п.).

С учетом условий эксплуатации экскаваторов-драглайнов, таких как изменяющиеся частоты вращения агрегатов и серьезные ударные нагрузки, которые испытывают узлы подъемной и тяговой лебедок в процессе работы, становится очевидным, что только лишь с использованием однократного замера данных и обработки параметров волны методом прямого спектрального анализа невозможно в полной мере оценить техническое состояние основных узлов экскаватора и выявить все дефекты оборудования, особенно находящиеся на начальной стадии своего развития. К сожалению, на сегодняшний день в мире не существует единого универсального метода, который мог бы с одинаковой эффективностью применяться при экспресс-диагностике и/или при периодическом мониторинге технического состояния [1, 2]. Только результаты комплексного использования нескольких различных диагностических подходов предоставляют широкие возможности для эффективной оценки фактического состояния узлов и агрегатов работающей машины. Причем конкретное сочетание методов контроля по параметрам механических колебаний зависит от типа объекта диагностирования и режимов его работы.

Выполненные исследования убедительно доказывают [6], что наилучших результатов при проведении диагностики технического состояния по параметрам механических колебаний на объектах угольной и горнорудной промышленности удается достичь, применяя комплекс методов вибродиагностики – прямой спектральный анализ, экспресс, анализ огибающей, анализ траектории/процессии ротора, метод ударных импульсов; в некоторых случаях к указанной совокупности целесообразно добавить кепстральный анализ и вейвлет-преобразование.

Результаты обработки параметров виброакустических волн, генерируемых при работе динамического оборудования экскаваторов типа драглайн, использованы при разработке действующих методических отраслевых руководящих документов Ростехнадзора [7], что позволило детально обосновать оценку технического состояния узлов и агрегатов карьерных экскаваторов.

В частности, определены основные требования к оборудованию и аппаратуре для проведения неразрушающего контроля, приведена классификация зон оценки технического состояния агрегатов динамического оборудования карьерных экскаваторов.

Однако, в настоящее время отсутствует универсальный комплексный критерий для оценки состояния горных машин по параметрам вибрации, в соответствии с которым можно провести нормирование отдельных составляющих сигнала, оценить степень их опасности и скорости развития, точно предсказать момент аварийного выхода

технологического оборудования из строя.

Существующие межотраслевые нормативные документы в области контроля параметров вибрации в недостаточной степени позволяют выполнить оценку риска развития повреждений и дефектов динамического оборудования горных машин. При том, что зоны границ технического состояния для отдельных механизмов и определены достаточно точно, однако скорость развития дефектов и сам момент перехода агрегата в следующую группу оценки состояния сегодня спрогнозировать очень сложно и зачастую невозможно. Основные причины этого заключаются в недостаточной проработке деградационных моделей изменения технического состояния и ограниченных возможностях применения критерии предельного состояния, разработанных для относительно небольшой группы горной техники. Таким образом, становится очевидным, что работу по совершенствованию параметров нормирования механических колебаний, генерируемых динамическим оборудованием карьерных экскаваторов, необходимо продолжить, для чего необходимы масштабные исследования процессов формирования, изменения и развития составляющих механических колебаний, свидетельствующих о наличии тех или иных дефектов динамического оборудования драглайнов.

Так, например, расцентровка валов агрегатов (см. рисунок 4) является одним из наиболее распространенных дефектов, присущих горным машинам в целом, наряду с дефектами подшипников и нарушением жесткости опорной системы. Нарушение соосности часто является следствием не качественно проведенных монтажных работ, на примере оборудования драглайнов часто можно наблюдать такие явления, как расцентровка валопровода генераторных групп, нарушение соосности установки электродвигателей с редукторами лебедок подъема и тяги, нарушение соосности вертикальной системы «двигатель-редуктор» в механизмах поворота, несоосность или даже перекос валов в редукторах. Следствием этого явления считается уменьшение ресурса подшипников качения до 90% от номинального, преждевременный выход из строя элементов соединительных муфт, зубчатых передач в редукторах, нарушение жесткости системы и отрыв агрегата от опор, повышенный уровень механических колебаний, действующий на оператора механизмов (машиниста экскаватора).

Наряду с перечисленными основными дефектами динамического оборудования экскаваторов-драглайнов необходимо отдельно рассмотреть дисбаланс ротора - высокозергетический низко-частотный разрушительный процесс, характеризующийся высоким уровнем параметров виброактивности роторного агрегата.

Существует порядка пяти основных диагностических признаков выявления дисбаланса мето-

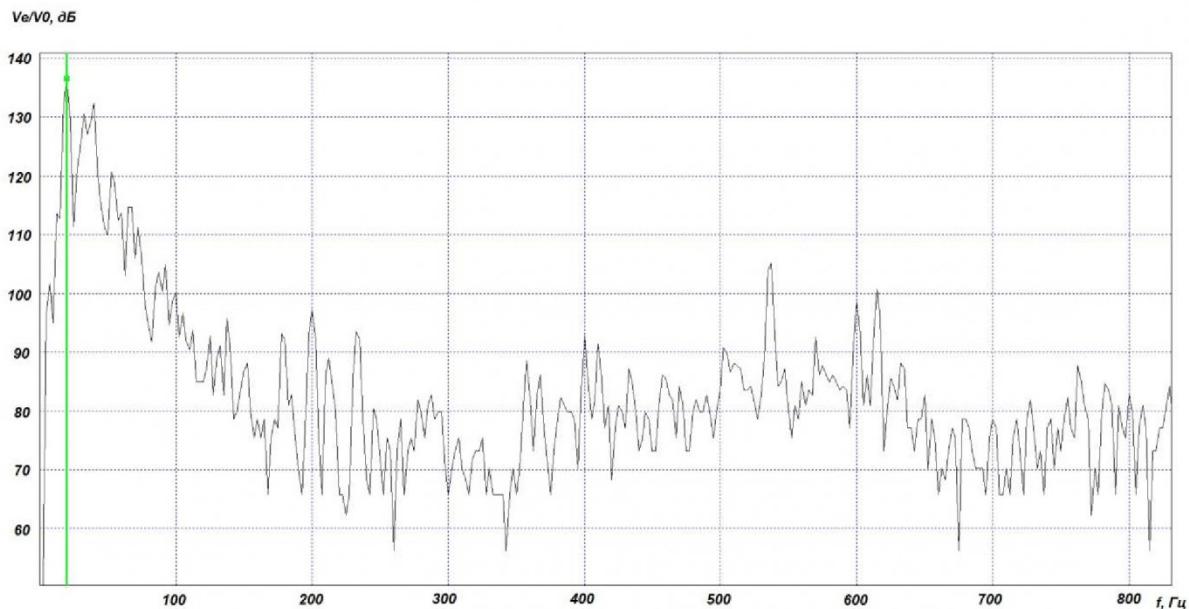


Рис. 5. Недопустимый уровень развитого дисбаланса ротора электродвигателя тяговой лебедки экскаватора ЭШ 20/90.

дами контроля по параметрам механических колебаний. Часть из них сосредоточена в области анализа спектрального состава виброакустической характеристики, другие признаки можно найти при помощи методов анализа траектории движения ротора, вейвлет-преобразования [8] или анализа изменения фазы оборотной составляющей вибрации.

На характер параметров вибрации при дисбалансе оказывает существенное влияние степень развития дефекта и его тип (динамический, тепловой и т.п.) [9, 10]. Однако, основным диагностическим признаком дисбаланса является наличие ярко выраженной во всех плоскостях пространственного положения агрегата первой гармоники оборотной частоты, либо ее гармонического ряда k_{f_r} [11, 12].

Для того, чтобы подтвердить данный дефект по этим признакам (полностью совпадающими с признаками наличия нарушения жесткости опорной системы) целесообразно применять, например, метод анализа траектории/процессии ротора [13]. В этом случае диагностическим признаком наличия дефектов служит форма траектории на фазовом портрете характеристики по параметру виброперемещения. В частности, явлению дисбаланса ротора соответствует кривая в форме эллипса, что подтверждает наличие на агрегате данного дефекта.

Таким образом, подводя итог вышесказанному, можно заключить, что основная цель настоящего исследования, а именно – создание научных предпосылок для разработки специализированного комплекса диагностических правил выявления дефектов оборудования экскаваторов типа драглайн с использованием методов виброанализа, в

значительной степени достигнута.

Разработано и/или формализовано около 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.

Кроме того, при формализации признаков учтены результаты обработки волны методами ударных импульсов, эксцесса, вейвлет-преобразования и контурной характеристики. Базы данных по параметрам виброакустического сигнала, собранные учеными ИУ СО РАН за последние 10 лет, содержат информацию о характеристиках вибрационной активности самого разного технологического оборудования. Обобщая статистику, 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 [14, 15].

Выполненные исследования убедительно показывают, что только системный комплексный подход к применению современных диагностических методов предоставит возможность минимизировать аварийные простои сложного дорогостоящего технологического оборудования и избежать несчастных случаев, вызванных недопустимым техническим состоянием эксплуатируемых средств механизации открытых горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герике, Б. Л. Диагностика горных машин и оборудования. Учебное пособие. / Б. Л. Герике, Г. И. Козовой, В. С. Квагинидзе, А. А. Хорешок, П.Б. Герике / Москва, 2012. – 400 с.
2. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-коррп. РАН 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. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово – 2012 год. – 18 с.
5. Кравченко, В. М. Повреждения подшипников качения в результате износа./В. М. Кравченко, В. А. Сидоров, В. В. Буцкин// Горное оборудование и электромеханика. - № 2, 2013. – С. 45-47.
6. Герике, П. Б. Вибродиагностика оборудования угольной и горнорудной промышленности. / Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня: Институт угля Сибирского отделения РАН. – М. – изд-во «Горная книга». – 2013. - №OB 6. – С. 440 – 446.
7. РД 15-14-2008. Методические рекомендации о порядке проведения экспертизы промышленной безопасности карьерных одноковшовых экскаваторов.
8. 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.
9. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press, 2002, P.726.
10. Balducci 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. June 16 – 20, 2014, Düsseldorf, Germany.
11. Барков А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. Учебное пособие. / А. В. Барков, Н. А. Баркова / Издательство СПбГМТУ. Санкт Петербург, 2004. — 156 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. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / Ширман А.Р., Соловьев А.Б. / Москва, 1996. – 276 с.
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. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 № 116-ФЗ.

Поступило в редакцию 19.04.2015

DEVELOPMENT OF COMPLEX OF DIAGNOSTIC RULES TO DETECT DEFECTS IN THE EQUIPMENT OF MINING SHOVELS.

Gericke Pavel .B.
C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: am_besten@mail.ru

Institute of Coal of the Siberian Branch of the RAS, 10 Leningradsky Prospect, Kemerovo, 650065, Russian Federation.

Abstract

This paper presents the results of the analysis of vibration characteristics of dynamic equipment mining shovels. A set of more than 60 diagnostic rules for automated detection of major damage to property on the basis of selective frequency bands warning systems for predictive maintenance of mining machines. Provides detailed classification of defects dynamic equipment mining shovels, which are selected on the basis of specific and substantiated methods of vibration analysis, the most suitable for rapid and precision of the automated control of a technical condition researched objects. The efficiency of an integrated diagnostic approach for evaluating the technical condition of the mechanisms in the parameters of mechanical vibrations. It is proved that only the widespread use of modern methods of vibration diagnostics and non-destructive testing allows early detection of

equipment defects of mining shovels. The results of these researches demonstrate the need to move categorically repair and maintenance departments of industrial enterprises in the service system technology on its actual technical condition, a platform for the implementation of the basic elements of the concept which will serve as a designed complex of diagnostic rules detecting defects on the analysis of the parameters of mechanical vibrations.

Keywords: vibration analysis, mining shovel, dynamic equipment, spectral analysis, predictive maintenance systems.

REFERENCES

1. Gericke B.L., Kozovoy G.I., Kvaginidze V.S., Khoreshok A.A., Gericke P.B. , Diagnostika gornykh mashin i oborudovaniya [Vibration analysis of mining machinery and equipment]. Moscow, 2012. 400 p. (rus)
2. 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)
3. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA. (eng)
4. Eshcherkin P.V. Razrabotka metodiki diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya dizel'-gidravlicheskikh 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)
5. Kravchenko V.M., Sidorov V.A., Butsukin V.V. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2013. #2. Pp. 45-47. (rus)
6. Gericke P.B. *Otdel'nyy vypusk Gornogo informatsionno-analiticheskogo byulletenya: Institut uglya Sibirskogo otdeleniya RAN*. Mining book Publishers. 2013. #OV6. Pp. 440-446. (rus)
7. RD 15-14-2008. Metodicheskie rekomendatsii o poryadke provedeniya ekspertizy promyshlennoy bezopasnosti kar'ernykh odnokovshovykh ekskavatorov [Methodical recommendations on how to conduct the examination of industrial safety of mining shovels]. Moscow, 2008. 40 p. (rus)
8. 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)
9. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press. 2002. 726 p. (eng)
10. Balducci 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. June 16 – 20, 2014, Düsseldorf, Germany. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/> (eng)
11. 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)
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. Shirman A.R., Solov'ev A.B. Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mekhanicheskogo oborudovaniya [The practical vibration analysis and monitoring of mechanical equipment] Moscow: Spectrum engineering Publishers, 1996. 276 p. (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. 524 p. (rus)
15. Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii «O promyshlennoy bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov» [Federal Law of the Russian Federation "On industrial safety of hazardous production facilities"]. № 116-FZ. 1997.

Received 19 April 2015