

ПОИСК ПРЕДПОСЫЛОК ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЕДИНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОЙ ТЕХНИКИ

П. Б. Герике

Searching for prerequisites in order to create a uniform diagnostic criterion to evaluate the maximum technical state of mountain machinery

P. B. Gericke

The present work is based on the results of the analysis of existing results on creation of unified diagnostic criterions that are fit for execution of evaluation of technical condition of energy mechanical equipment of mining machinery and development of mathematic degradation models of measuring the condition of complex mechanical systems. The carried out analysis of diagnostic characteristics that were received during operation of energy-mechanical equipment of mining excavators and diesel-hydraulic drilling installations allowed to group together defects of this type of mining machinery based on 7 main groups which correspond with more than one hundred of diagnostic indicators on vibration parameters. These characteristics were classified and formalized for convenience of use during development of algorithm code of automatized control of complex systems based on parameters of generated mechanical oscillations. As part of execution of this investigation necessity of use of complex diagnostic approach for evaluation of technical condition of mechanisms based on parameters of generated vibration was justified. It was shown that only with the widespread use of modern methods of vibration diagnostics and non-destructive control there is an opportunity for modern flaw detection of mining machinery and development of forecast models and change of their technical condition. Results of conducted investigations peremptorily prove the possibility in principle to create a group of proper unified diagnostic criterions which can be used for execution of short-term forecasting of diagnostic parameters. The developed complex of diagnostic regulations of fault detection based on results of mechanical oscillation parameters and created unified diagnostic criterions of evaluation of condition might serve as the platform for realization of machinery servicing that are based on the analysis of mechanical oscillation parameters, that are developed based on the number of main groups of defects of diagnosed equipment.

Keywords: vibration monitoring; unified diagnostic criterion; forecasted modelling; mining excavators; diesel-hydraulic drilling installations.

Настоящая работа построена на результатах анализа существующих наработок по созданию единых диагностических критериев, пригодных для выполнения оценки технического состояния энергомеханического оборудования горных машин и разработки математических деградационных моделей изменения состояния сложных механических систем. Проведенный анализ диагностических характеристик, полученных при работе энергомеханического оборудования карьерных экскаваторов и дизель-гидравлических буровых установок, позволил сгруппировать дефекты данного типа горных машин по семи основным группам, которым в совокупности соответствуют более ста диагностических признаков по параметрам вибрации. Данные признаки были классифицированы и формализованы для удобства использования при разработке кода алгоритма автоматизированного контроля сложных систем по параметрам генерируемых механических колебаний. В рамках выполнения настоящей исследования обоснована необходимость 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 представляется возможность для своевременного выявления дефектов оборудования горных машин и разработки прогнозных моделей изменения их технического состояния. Результаты проведенных исследований, бесспорно, доказывают принципиальную возможность создания группы адекватных единых диагностических критериев, которые могут быть использованы для выполнения краткосрочного прогнозирования диагностических параметров. Платформой для реализации элементов концепции системы обслуживания техники по ее фактическому техническому состоянию могут послужить разработанный комплекс диагностических правил выявления дефектов по результатам анализа параметров механических колебаний и создаваемые единые диагностические критерии оценки состояния, основанные на анализе параметров механических колебаний, разрабатываемые по количеству основных групп неисправностей диагностируемого оборудования.

Ключевые слова: вибродиагностика; единый диагностический критерий; прогнозное моделирование; карьерные экскаваторы; дизель-гидравлические буровые установки.

Применяемая на сегодняшний день в рамках экспертизы промышленной безопасности (ЭПБ) система оценки технического состояния горных машин по параметрам механических колебаний [1, 2] является несовершенной и не позволяет быстро и эффективно выявлять дефекты оборудования с оценкой степени их вклада в общий уровень исследуемого сигнала.

Разработка единого диагностического критерия (ЕДК), пригодного для выполнения оценки фактического технического состояния самых разных объектов диагностирования по результатам анализа параметров генерируемой при их работе вибрации, является весьма актуальной и не решенной на сегодняшний день научной задачей. Представляется

очевидным, что из-за существующих ограничений в области применения методов контроля по параметрам механических колебаний выборка диагностических характеристик и параметров, необходимая для создания ЕДК для каждого из элементов конструкции сложной механической системы, будет в своем роде уникальна. Именно такой, распределенный подход к оценке и подбору характеристик, точно подходящих для описания предельного состояния объектов, является отличительной особенностью проводимого исследования, в то время как другие авторы [3, 4] рассматривают в качестве информативного критерия оценки в основном только лишь один диагностический параметр – среднеквадратическое значение виброускорения или виброскорости в диапазоне 10...1000 Гц.

Объектом данного исследования является выборка из тридцати единиц одноковшовых электрических карьерных экскаваторов (модели ЭКГ-5А; ЭКГ-8И; ЭКГ-10; ЭКГ-12,5 и др.) и 10 единиц дизель-гидравлических установок серии DML-LP, наблюдение за которой осуществлялось в течение пяти лет. Все данное оборудование эксплуатируется на угольных разрезах Кузбасса и подлежит прохождению обязательной процедуры экспертизы промышленной безопасности как выработавшее свой нормативный срок.

Основным методом неразрушающего контроля, наилучшим образом подходящим для решения стоящих перед настоящим исследованием задач, является контроль по параметрам вибрации – единственный метод НК, который с высокой степенью достоверности позволяет выявлять абсолютное большинство дефектов диагностируемого энергомеханического оборудования вне зависимости от степени их развития. В рамках настоящего исследования обосновывается эффективность применения комплексного диагностического подхода, включающего в себя такие методы практического виброанализа, как прямой спектральный анализ, эксцесс, анализ огибающей и некоторые другие. Конкретное сочетание методов в данном случае определяется типом объекта исследования и режимами его работы, а также необходимой степенью детализации проводимого исследования.

В контексте настоящего исследования наибольший интерес представляют прогнозны модели, описывающие процесс деградации технического состояния оборудования карьерных экскаваторов как наиболее сложных технических устройств, эксплуатируемых на открытых горных работах [5]. Существующие на сегодняшний день математические прогнозны модели, описывающие процессы деградации технического состояния энергомеханического оборудования горных машин (развитие таких дефектов, как дисбалансы ротора; нарушение соосности, перекосы и искривления валов агрегатов; дефекты подшипников качения; нару-

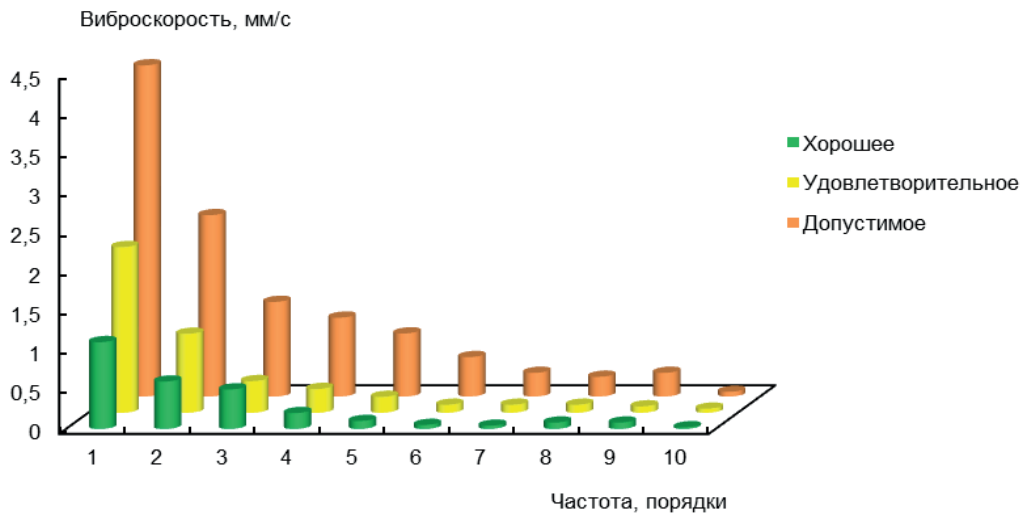


Рисунок 1. Пример нормирования состава полигармонической волны, генерируемой при работе преобразовательного агрегата электрического одноковшового экскаватора типа ЭКГ-10.

шение жесткости системы и(или) структурный резонанс; повреждения зубчатых передач; соединительных муфт и т. д.) и позволяющие выполнять средне- и долгосрочное прогнозирование изменения характеристик технического состояния сложных механических систем по результатам анализа параметров генерируемой при их работе вибрации, являются несовершенными. Большинство существующих моделей такого типа ориентировано на прогнозирование деградационных процессов только лишь единичных элементов энергомеханического оборудования горных

машин (например, объектом может служить подшипник редуктора вращателя буровой установки или подшипник сетевого двигателя экскаватора типа ЭКГ). Таким образом, область их применения крайне мала, а апробация результатов моделирования не всегда достаточна.

Универсальной деградационной модели, ориентированной на прогнозирование процессов изменения технического состояния сложных механических систем по результатам анализа параметров генерируемой при их работе вибрации и обладающей высокой степенью достоверности

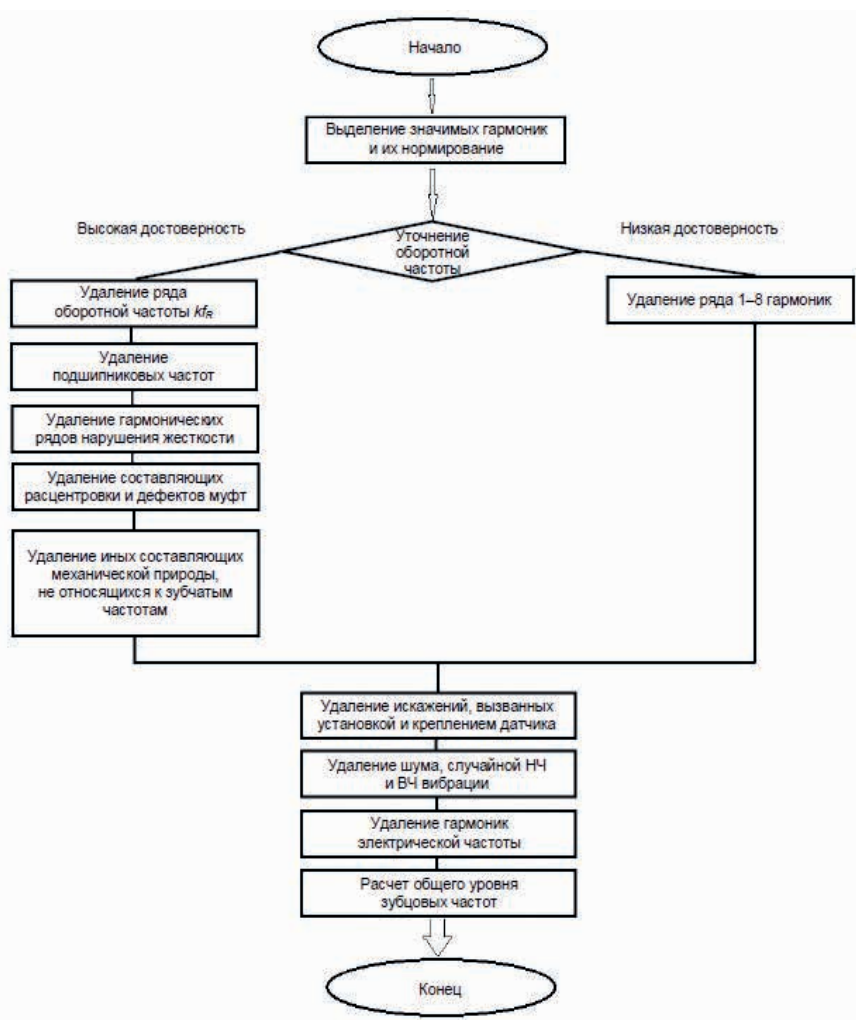


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма выявления диагностического критерия на примере дефектов зубчатых передач (анализ прямого спектра по параметру виброскорости в расширенном диапазоне частот).

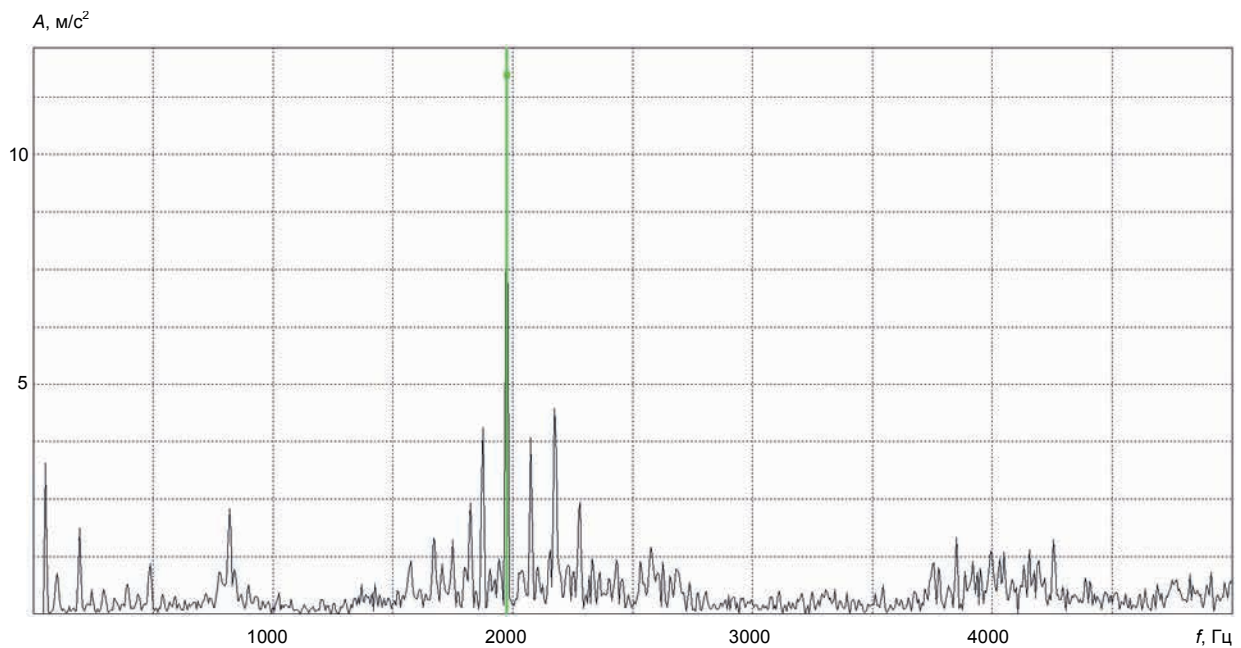


Рисунок 3. Спектр по параметру виброускорения, записанный на опоре подшипника качения генератора подъема экскаватора ЭКГ-8И (максимальная амплитуда гармонических составляющих зафиксирована на одной из подшипниковых частот, что в данном случае свидетельствует о наличии раковины внешнего кольца).

на сегодняшний день не существует. Причины этого обусловлены недостаточной изученностью вопросов динамики горных машин, отсутствием представительных баз данных по параметрам вибрации, сложностями в интерпретации полученных результатов, трудностью реализации предлагаемых громоздких и не всегда адекватных математических моделей. Кроме того, разработка достоверных прогностических моделей развития дефектов оборудования горных машин, основанных на результатах анализа параметров механических колебаний, невозможна без наличия устойчивой теоретической базы [3], учитывающей характер изменения спектрального состава исследуемых характеристик [4, 6]. Для разработки эффективной модели потребуются данные результатов комплексного диагностического подхода к анализу параметров механических колебаний и единые диагностические критерии оценки состояния однотипных объектов исследования.

Таким образом, становится очевидным, что для каждой отдельной группы дефектов элементов оборудования (редукторов различного типа, подшипников качения и скольжения, электродвигателей, генераторов, соединительных муфт, крепежа и т. д.) должен быть разработан свой уникальный единый диагностический критерий оценки технического состояния, учитывающий результаты комплексной обработки исходных данных несколькими различными методами вибродиагностики. Уникальность данного критерия заключается в том, что результаты его применения исключают необходимость использования для проведения оценки и прогнозирования процесса изменения технического состояния объектов диагностирования различных громоздких диагностических признаков и правил.

В рамках действующей сегодня на предприятиях угольной и горно-рудной промышленности России системы планово-предупредительных ремонтов сроки проведения обслуживания технических устройств четко регламентированы. В этих условиях очень важным является наличие достоверной информации о том, доработает ли объект диагностирования до очередного ремонта без возникновения аварийной ситуации или нет. Именно поэтому наибольший приоритет должен быть отдан краткосрочным прогнозируемым моделям.

Наиболее эффективное решение поставленной задачи может быть получено с использованием алгоритмов адаптивного краткосрочного прогнозирования процесса деградации технического состояния объектов исследования. Доказано, что подобные алгоритмы наилучшим образом используют экспериментальные данные предыдущих измерений, адаптируя параметры модели к изменению внешних условий. Исследования разных авторов [3, 7, 8] позволили выявить главный недостаток существующих краткосрочных адаптивных прогностических моделей, а именно, их крайне ограниченную область применения. Большинство работ, связанных с разработкой единого диагностического критерия, основанного на результатах анализа параметров вибрации, ограничивается подшипниками качения [8, 9].

Кроме того, существенные ограничения на область применения разрабатываемых критериев оценки оказывают такие факторы, как низкие частоты вращения тихоходных агрегатов и наличие так называемых «паразитных» составляющих частотного спектра [8]. Эти составляющие,

в свою очередь, могут быть вызваны как ошибками при установке датчиков и наличием дефектных соединений в кабелях виброизмерительной аппаратуры, так и конструктивными особенностями объектов исследования (труднодоступность точек измерения, значительные знакопеременные ударные нагрузки и т. д.). Наиболее простой способ решения данной проблемы состоит в использовании при разработке единых критериев дополнительного коэффициента, учитывающего наличие «паразитных» составляющих сигнала, который обычно принимает значение 0 или 1 [8]. Однако данный подход существенно упрощает представление о сложных механических системах и приводит к потере части ценной диагностической информации. Поэтому применение его является нецелесообразным, оптимальным выходом из данной проблемы будет использование гибко настроенных алгоритмов фильтрации, позволяющих очистить спектр от «паразитного шума».

В настоящее время на рынке специализированного программного обеспечения широкое распространение получили алгоритмы математических прогностических моделей, реализуемых в программном обеспечении некоторых отечественных разработчиков, специализирующихся на производстве виброанализаторов и создании программного обеспечения для анализа регистрируемых характеристик (например, Dream for Windows фирмы «ВАСТ», г. С.-Петербург или Аврора фирмы ООО «Вибро-Центр», г. Пермь и т. п.). Такие модели, как правило, ориентированы на прогнозирование минимального гарантированного и ожидаемого остаточного ресурса оборудования. В качестве базового и зачастую единственного диагностического критерия здесь обычно используется общий уровень среднеквадратического значения виброскорости.

Настоящая работа ориентирована на совершенствование методологических подходов к диагностике сложных механических систем, решение задач по проблематике создания прогностических моделей деградации технического состояния различных узлов и агрегатов энерго-механического оборудования горных машин с использованием разрабатываемых ЕДК.

Обоснование критериев предельного технического состояния, пригодных для выявления дефектов и выполнения оценки степени развития повреждений элементов технических устройств, является начальным этапом разработки адекватной прогностической модели.

Необходимый и достаточный минимум диагностической информации, практически полностью характеризующей фактическое состояние 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:

- 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 диапазоне (10...10 000 Гц);

– частотные полосы, ряды или отдельные гармоники, свидетельствующие о наличии поврежденных однотипного характера (например, гармонические ряды нарушения жесткости системы $[0,4 f_r \dots 2,4 f_{r_{\max}}]$ или расцентровки двигателя с редуктором $[f_r \dots 4 \dots 6 f_{r_{\max}}]$);
 – размах виброперемещения в диапазоне $10 \dots 1000$ Гц;
 – СКЗ виброскорости в октавной полосе частот, включающей в себя частоту вращения ротора [10–12].

Обзор существующих научных публикаций по тематике данной проблемы [7, 9, 12] показал, что разработка алгоритмов автоматизированной диагностики по результатам оценки информативных частот посвящено большое количество работ, ориентированных на решение задач практического виброанализа. Однако область их применения существенно ограничена однотипными несложными механическими объектами и требует наличия базы данных по частотным признакам дефектов данного оборудования, что доказывает несовершенство существующих алгоритмов автоматизированного поиска дефектов по частотным наборам базовых признаков. Кроме того, на стабильность работы подобных алгоритмов существенное влияние оказывают качество диагностических данных, наличие шумов, случайных составляющих и искажений сигнала.

Проведенные ранее в этой области исследования показали [8], в частности, что для наиболее эффективного описания технического состояния такого классического объекта вибродиагностики, которым является подшипник качения, необходимо использовать сразу несколько основных диагностических критериев:

1. Общий уровень подшипниковых составляющих спектра по параметру виброскорости;
2. Общий уровень сигнала по параметру виброускорения;
3. «Меру подобия», определяемую по спектру огибающей высокочастотного сигнала;
4. Анализ параметров полигармонических волн с применением эксцесса.

Системные работы по формализации диагностических признаков в области виброанализа для выявления дефектов других элементов энергомеханического оборудования (помимо подшипников качения), пригодных для создания единого диагностического критерия, ранее не проводились. Основной целью настоящего исследования является разработка оригинальных диагностических критериев, позволяющих получить максимум полезной диагностической информации из исходных полигармонических волн, генерируемых при работе различных агрегатов и узлов энергомеханического оборудования горных машин. Кроме того, такие критерии должны быть эффективны на любых этапах развития дефектов – от зарождения, появления первых малозаметных изменений в спектральном составе исследуемых характеристик до стадии накопления повреждений и аварийного выхода объекта из строя.

Анализ диагностических характеристик, полученных при работе энергомеханического оборудования электрических экскаваторов, позволил сгруппировать дефекты данного типа горных машин по семи основным группам, которым в совокупности соответствуют более ста диагностических признаков по параметрам вибрации. Данные признаки были классифицированы и формализованы для удобства использования при разработке кода алгоритма автоматизированного контроля сложных систем по параметрам генерируемых механических колебаний.

Основным приемом, которым пользуются исследователи для повышения эффективности результатов диагностики, является уточнение оборотной частоты, такая процедура активно реализуется при разработке программного обеспечения [8, 13]. Подобные алгоритмы хорошо изучены и могут быть использованы при разработке спектральных масок высокой степени детализации (рис. 1). Главным недостатком таких подходов является то, что при смене объекта диагностирования работу по нормированию составляющих спектра и созданию спектральных масок необходимо начинать заново. Задачу по сбору диагностической информации существенно упростило бы применение стационарного комплекса контроля параметров вибрации, однако использование систем такого класса на исследуемом технологическом оборудовании экономически неоправданно.

С учетом ограничений морально устаревшей системы планово-предупредительных ремонтов (ППР), действующей сегодня на предприятиях ТЭК Кузбасса, наибольший интерес представляют результаты краткосрочного прогнозирования изменения фактического состояния эксплуатируемого оборудования. Действительно, в условиях системы ППР намного актуальнее стоит задача по созданию краткосрочного прогноза (один или два интервала диагностирования), позволяющего дать точную оценку вероятности безотказной работы агрегата до момента проведения ближайшего ремонта (технического обслуживания). Разработка долгосрочных прогнозов изменения технического состояния исследуемых объектов в сложившейся ситуации представляет чистый академический интерес и может быть практически реализована только как один из базовых элементов создания концепции обслуживания горных машин по их фактическому состоянию. Анализ публикационной активности по тематике настоящего исследования позволил сделать вывод об эффективности

использования адаптивных экспоненциальных математических моделей для выполнения краткосрочного прогнозирования. Доказано [8, 14], что при краткосрочном прогнозировании процесса изменения технического состояния сложных механических систем именно адаптивные методы предоставляют возможность получения хорошей сходимости полученных результатов. Однако представляется совершенно очевидным, что на сегодняшний день не была осуществлена апробация данных методик на значительном количестве элементов конструкций горных машин.

Большинство из существующих краткосрочных моделей изменения технического состояния основано на построении прогноза изменения величины общего уровня сигнала по параметру виброскорости $v_{e_{\text{СКЗ}}}$. Моделей, способных адекватно осуществить прогноз сразу по группе информативных частот, описывающих дефекты подшипников качения, зубчатых передач, нарушения соосности валов агрегата и т. д., на сегодняшний день не существует; их разработка является не в пример более сложной задачей, по сравнению с моделированием среднеквадратического значения общего уровня вибрации. Кроме того, эффективнее оценить остаточный ресурс сложных механических систем можно только при наличии доступных и высокоточных способов выделения трендов детерминированной составляющей виброакустического сигнала, пригодных для создания краткосрочного прогноза изменения технического состояния объекта исследования. Выходом по разрабатываемым моделям должны стать три основных показателя, характеризующих состояние механической системы, – величина гарантированного остаточного ресурса, ожидаемый остаточный ресурс и оптимальный междиагностический интервал [13, 14].

Исследование параметров полигармонических волн, генерируемых при работе энергомеханического оборудования горных машин, позволило сделать вывод о том, что необходимым условием эффективной и информативной оценки технического состояния и осуществления достоверного прогноза его изменения является использование результатов комплексного диагностического подхода. Опыт, полученный в области практического виброанализа сложных механических систем, подсказывает, что такой подход должен состоять минимум из трех отдельных диагностических методов – спектрального анализа по параметрам виброскорости и виброускорения в расширенном частотном диапазоне, анализа огибающей спектра и эксцесса. В этом случае рассчитываемый единый диагностический критерий (ЕДК), используемый для оценки и прогнозирования изменения технического состояния механической системы, должен быть основан на результатах анализа параметров исходных характеристик с применением как минимум этих трех диагностических подходов (конкретное сочетание методов зависит от типа объекта диагностирования).

ЕДК, наилучшим образом подходящий для выполнения оценки состояния однотипных объектов, может быть разработан с применением многомерного пространства диагностических признаков при помощи алгоритмов скаляризации [8, 15, 16]. Таким образом, данный алгоритм обязательно должен включать пошаговую сегментацию групп объектов с различной степенью развития дефектов энергомеханического оборудования. Очевидно, что должно быть разработано несколько таких критериев, по одному на каждую группу дефектов (например, ЕДК для дефектов подшипников, нарушения центровки, нарушения жесткости системы, дефектов соединительных муфт, дефектов зубчатых передач в составе редукторов и т. д.).

Для разработки ЕДК для каждого из типов дефектов энергомеханического оборудования электрических экскаваторов и дизель-гидравлических буровых установок необходимо удалить из спектра все «лишние» гармонические составляющие, генерируемые другими процессами, т. е. осуществить процедуру клиппирования.

Алгоритмы выделения информативных составляющих дефектов подшипников качения, зубчатых передач, соединительных муфт, центровки валов и т. п. должны быть основаны на удалении из спектра всех составляющих иной природы. Таким образом, число описываемых алгоритмов клиппирования должно равняться количеству потенциально возможных дефектов исследуемого оборудования. Пример алгоритма выявления критерия наличия дефектов зубчатых передач в составе редукторов переборного типа, используемых в конструкции электрических экскаваторов, приведен ниже на рис. 2.

В данном алгоритме применяется процедура уточнения оборотной частоты вращения, основанная на принципе поиска составляющих спектра с максимальными амплитудами в низкочастотном диапазоне. Существует несколько аналогичных процедур, отличающихся принципами выявления возможных оборотных (не всегда совпадающих с максимально выраженными гармониками), наиболее эффективной из которых представляется программа расчета, разработанная в рамках исследования [8]. Поскольку данный алгоритм показал высокую достоверность при работе со спектрами виброскорости и виброускорения подшипников качения, где максимальные амплитуды значащих гармоник априори не принадлежали оборотной частоте (рис. 3), то он, безусловно, с успехом может быть применен при разработке ЕДК для других типов объектов диагностирования.

Результаты выполненных автором настоящей работы исследований позволили сформулировать шесть основных диагностических признаков оценки состояния зубчатых передач по параметрам вибрации:

1. Нормированный общий уровень (признак 1а) и пиковое значение (признак 1б) виброускорения в диапазоне 50...10 000 Гц;
2. Общий уровень составляющих зубчатых частот по параметру виброускорения (2...3000 Гц);
3. Глубина модуляции спектра огибающей вибросигнала в диапазоне $0,5 f_{zmin} \dots 20 f_{zmax}$ Гц, где f_{zmin} , f_{zmax} – минимальная и максимальная по частоте гармоники любой из базовых зубцовых частот соответственно;
4. Общий уровень виброускорения в низкочастотном диапазоне (5 Гц ... 15 f_{R1}), содержащий признаки наличия несоосности и(или) изгиба валов, неуравновешенности элементов редуктора, нарушения жесткости системы;
5. Флуктуация амплитуд гармоник базовых $k f_R$, $m f_Z \pm n_R$ и промежуточных модуляционных частот f_m и $f_m \pm n f_R$, указывающая на степень развития повреждения зубчатой пары.

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

На основе данных шести базовых признаков автором разработан ЕДК для диагностики редукторов переборного типа, используемых в конструкции экскаваторов типа ЭКГ. Практическая реализация настоящего единого критерия оценки в программном обеспечении для автоматизированного контроля параметров вибрации позволит значительно упростить процедуру анализа данных и максимально повысить достоверность получаемых результатов.

ЕДК, создаваемые для оценки состояния других элементов конструкции горных машин, также могут с успехом применяться для разработки адаптивных деградационных моделей, позволяющих провести краткосрочное прогнозирование на один-два интервала моделирования, что вполне достаточно в условиях действующей на предприятиях отрасли системы плано-предупредительных ремонтов [13].

Таким образом, становится очевидным, что решение задачи по разработке ЕДК для всех типов энергомеханического оборудования горных машин и созданию прогностических моделей изменения технического состояния по параметрам вибрации является необходимым условием для внедрения систем обслуживания техники по ее фактическому состоянию [14]. Внедрение такой системы невозможно без наличия четко структурированной базы данных, содержащей информацию о динамике изменения диагностических параметров для широкого типового и номенклатурного ряда горной техники. Предложенный в рамках настоящего исследования подход к разработке единых диагностических критериев и моделированию деградационных процессов в сложных механических системах имеет весьма важное практическое значение и может быть использован, кроме прочего, для эффективного решения задач, связанных с минимизацией аварийных отказов техники и повышением безопасности при проведении открытых горных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические рекомендации о порядке проведения экспертизы промышленной безопасности карьерных одноковшовых экскаваторов: РД 15-14-2008: введ. в действие с 01.08.08. Сер. 26, вып. 9. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2008. 108 с.
2. Методические указания по проведению экспертизы промышленной безопасности ленточных конвейерных установок: РД 15-04-2006: утв. приказом Федер. службы по экол., технол. и атомному надзору от 26.02.06 № 125: введ. в действие с 01.06.06. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2009. 150 с.
3. Ещеркин П. В. Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2012. 18 с.
4. Bently D. E., Hatch C. T. Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics. Minden: Bently Pressurized Bearing Company, 2002. 726 p.
5. Герики П. Б. Анализ основных закономерностей изменения технического состояния оборудования экскаваторов типа драглайн // Вестник КузГТУ. 2016. № 1. С. 70–77.
6. Delvecchio S., Delia G., Mucchi E., Dalpiaz G. Advanced signal processing tools for the vibratory surveillance of assembly faults in diesel engine cold tests // Journal of Vibration and Acoustics. 2010. Vol. 132, Issue 2, 021008-10. DOI 10.1115/1.4000807.
7. Дрыгин М. Ю. Разработка стационарного диагностического комплекса для экскаватора типа ЭКГ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2012. 20 с.
8. Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИФИ, 2007. 170 с.

Павел Борисович Герики,
am_besten@mail.ru

Федеральный Исследовательский Центр угля и углехимии СО РАН
Россия, Кемерово,
просп. Ленинградский, 10

9. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.
10. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М., 1996. 276 с.
11. Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. Т. 7 / под ред. чл.-корр. РАН В. В. Клюева. М., 2005. 828 с.
12. Лукьянов А. В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. 230 с.
13. Герики П. Б. Адаптивное прогностическое моделирование процессов деградации технического состояния генераторных групп карьерных экскаваторов на основе анализа параметров генерируемой при их работе вибрации // Вестник КузГТУ. 2015. № 6. С. 71–77.
14. Краковский Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. Новосибирск: Наука, 2006. 227 с.
15. Попков В. И., Мышинский Э. Л., Попков О. И. Виброакустическая диагностика в судостроении. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
16. Rudloff L., Arghir M., Bonneau O., Guingo S., Chemla G., Renard E. Experimental Analysis of the Dynamic Characteristics of A Hybrid Aerostatic Bearing // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2012. Vol. 134(18). DOI 10.1115/1.4006060.

REFERENCES

1. RD 15-14-2008, *Metodicheskiye rekomendatsii o poryadke provedeniya ekspertizy promyshlennoy bezopasnosti kar'ernykh odnokovshovykh ekskavatorov* [Methodological recommendations on the procedure of executing expertise of industrial safety of pit single-bucket excavators].
2. RD 15-04-2006, *Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu ekspertizy promyshlennoy bezopasnosti lentochnykh konveyernykh ustanovok* [Procedural guidelines on execution of expertise of industrial safety of belt-type of conveyor units].
3. Esherkin P. V. 2012, *Razrabotka metodiki diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya dizel-gidravlicheskiikh burovnykh stankov* [Development of procedural guidelines of diagnosing and forecasting technical condition of diesel-hydraulic drilling rigs: synopsis of a thesis of the candidate of engineering sciences]. Kemerovo, 18 p.
4. Bently D. E., Hatch C. T. 2002, *Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics*, Bently Pressurized Press, 726 p.
5. Gericke P. B. 2016, *Analiz osnovnykh zakonomernostey izmeneniya tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya ekskavatorov tipa draglain* [Analysis of main regularities of measuring technical condition of equipment excavators of dragline type]. *Vestnik KuzGTU* [Vestnik of Kuzbass State Technical University]. No. 1, pp. 70–77.
6. Delvecchio S., Delia G., Mucchi E., Dalpiaz G. Advanced signal processing tools for the vibratory surveillance of assembly faults in diesel engine cold tests, *Journal of Vibration and Acoustics*, April 2010, Vol. 132, Issue 2, 021008-10. DOI 10.1115/1.4000807
7. Drygin M. Y., 2012, *Razrabotka statsionarnogo diagnosticheskogo kompleksa dlya ekskavatora tipa EKG* [Development of stationary complex for pit Caterpillar type excavator: synopsis of a thesis of the candidate of engineering sciences]. Kemerovo, 20 p.
8. Sushko A. E. 2007, *Razrabotka spetsialnogo matematicheskogo i programmnogo obespecheniya dlya avtomatizirovannoy diagnostiki slozhnykh sistem* [Development of special mathematical software for automatized diagnostics of complex systems: thesis of the candidate of engineering sciences]. Moscow, National Research Nuclear University. 170 p.
9. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.
10. Shirman A. R., Solov'ev A. B. 1996, *Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mekhanicheskogo oborudovaniya* [Practical vibration monitoring and monitoring of condition of mechanical equipment]. 276 p.
11. Klyuyev V. V. 2005, *Nerazrushayushiy control: spravochnik* [Non-destructive control: quick-reference guide]. Vol. 7. Moscow, 828 p.
12. Lukyanov A. V. 1999, *Klassifikator vibrodiagnosticheskikh priznakov defektov rotornykh mashin* [Classifier of vibrodiagnostic defect symptoms of rotary machines]. Irkutsk, Irkutsk State Technical University, 230 p.
13. Gericke P. B. 2015, *Adaptivnoe prognosticheskoe modelirovaniye protsessov degradatsii tekhnicheskogo sostoyaniya generatornykh grupp kar'ernykh ekskavatorov na osnove analiza parametrov generiruemoy pri ikh rabote vibratsii* [Adaptive forecasting modeling of degradation processes of generator groups technical condition of mine excavators based on the analysis of parameters of generated vibration]. *Vestnik KuzGTU* [Vestnik of Kuzbass State Technical University]. No. 6, pp. 71–77.
14. Krakovskiy Y. M. 2006, *Matematicheskie i programmnye sredstva otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya* [Mathematical and software tools for evaluating the technical condition of equipment]. Novosibirsk, 227 p.
15. Popkov V. I., Mishinskiy E. L., Popkov O. I. 1989, *Vibroakusticheskaya diagnostika v sudostroenii* [Vibroacoustic diagnostics in shipbuilding]. Leningrad, 256 p.
16. Rudloff L., Arghir M., Bonneau O., Guingo S., Chemla G., Renard E. 2012, *Experimental Analysis of the Dynamic Characteristics of A Hybrid Aerostatic Bearing*. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 134(8). DOI 10.1115/1.4006060

Павел Борисович Герики,
am_besten@mail.ru

Федеральный Исследовательский Центр угля и углехимии СО РАН
Россия, Кемерово,
просп. Ленинградский, 10