

УДК 53.083(430.1)

РЕЗУЛЬТАТЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ПРИМЕНЕИТЕЛЬНО К СОЗДАНИЮ ЕДИНОГО КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ ФАКТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

THE RESULTS OF VIBRATION DIAGNOSTICS OF CENTRIFUGAL PUMPS IN RELATION TO THE CREATION OF A SINGLE CRITERION FOR ASSESSING THE ACTUAL TECHNICAL CONDITION OF THIS EQUIPMENT

Герике Павел Борисович²

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

Gericke Pavel B.²

Ph.D., Associate Professor

Блюменштейн Валерий Юрьевич¹,

доктор техн. наук, профессор, e-mail: blumenstein.vu@gmail.ru

Blumenstein Valeriy Yu.¹, Dr. Sc. (Engineering), Professor

¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

²Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН», пр. Советский, 18, Кемерово, 650000, Российская Федерация

²Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, 10 Leningradsky Prospect, Kemerovo, 650065, Russian Federation.

Аннотация.

Исследование параметров вибрационных характеристик, генерируемых при работе центробежных насосов, позволило провести классификацию дефектов данного оборудования по базовым группам (в зависимости от типа повреждения и степени его опасности), которым в общей сложности соответствует более ста диагностических признаков по параметрам вибрации, formalизованных для удобства их использования при разработке кода алгоритма автоматизированного контроля сложных систем по частотным наборам базовых признаков. Результаты работы позволили обосновать необходимость внедрения комплексного диагностического подхода для проведения детальной оценки технического состояния агрегатов по параметрам генерируемой при их работе вибрации. Показано, что только с широким использованием результатов, полученных с применением различных современных методов вибрационной диагностики, появляется возможность для эффективного выявления дефектов оборудования сложной техники и разработки деградационных прогностических моделей. В качестве фундамента настоящей работы использованы результаты анализа существующих подходов к разработке единых диагностических критериев, основанных на принципах вибродиагностики предельно изношенного энерго-механического оборудования. Созданный комплекс диагностических правил для выявления зарождающихся и развитых дефектов насосного оборудования по результатам анализа параметров механических колебаний и разрабатываемые единые диагностические критерии оценки состояния могут послужить в качестве платформы, необходимой для реализации основных элементов системы обслуживания техники по ее фактическому техническому состоянию. Результаты работы безапелляционно доказывают возможность создания группы единых диагностических критериев, пригодных для осуществления оценки технического состояния центробежных насосов и являющихся необходимым условием для осуществления эффективного краткосрочного прогнозирования исследуемых параметров при разработке адаптивных математических моделей.

Abstract.

Research of vibration parameters generated during operation of the centrifugal pump, allowing to classify defects on the equipment base groups depending on the degree of damage and danger. This defects corresponds to a total of more than a diagnostic features vibration parameters, formalized for ease of use in the development of the algorithm code of the automated control of complex systems on the frequency set of basic features. The

obtained research results have allowed possible to justify the need to implement an integrated diagnostic approach for conducting a detailed assessment of the technical condition of units in the parameters generated when the vibration. The article shows that only with the widespread use of the results obtained with the use of various modern methods of vibration diagnostics it becomes possible to effectively identify defects equipment of complex equipment and the development of predictive models of degradation. As the foundation of the present study used the results of the analysis of existing approaches to the development unified diagnostic criteria based on the principles of vibration diagnostics extremely worn-out energy-mechanical equipment. Created complex diagnostic rules to detect emerging and developed defects pumping equipment according to the analysis of mechanical vibrations and developed united diagnostic status evaluation criteria can serve as a platform necessary for the implementation of the basic elements of technology service system in its actual technical condition. The results prove categorically the possibility of creating a group unified diagnostic criteria suitable for evaluation of the technical condition of centrifugal pumps and is a prerequisite for effective short-term forecasting of the investigated parameters in the development of adaptive mathematical models. It is proved that the results of short-term forecasting is sufficient and appropriate to the minimum necessary for the implementation of the basic elements of the system maintenance of pumping equipment for its actual state.

Ключевые слова: вибродиагностика, обслуживание по фактическому состоянию, единый диагностический критерий, прогнозное моделирование, насосное оборудование.

Keywords: vibration analysis, maintenance for the actual technical condition, a single diagnostic criterion, predictive modeling, pump equipment.

Благодаря высокому КПД и относительной простоте конструкции центробежные насосы получили сегодня широкое распространение среди технических устройств, эксплуатируемых на обогатительных установках и фабриках Кузбасса. Исследования, проведенные на представительной выборке обогатительного оборудования (включая насосное оборудование различных типов), состоящей из более чем 150 единиц технологического оборудования, позволили сделать вывод о том, что в недопустимом техническом состоянии сейчас находится до 25% от общего числа технических устройств, подлежащих процедуре экспертизы промышленной безопасности. Нормы действующей на предприятиях отрасли морально устаревшей системы планово-предупредительных ремонтов (ППР) позволяют продолжать эксплуатацию заведомо неисправного оборудования, провоцируя возникновение аварийных ситуаций и подвергая опасности жизнь и здоровье обслуживающего и ремонтного персонала. Система оценки технического состояния технологического оборудования по результатам анализа параметров механических колебаний [1, 2], применяемая в рамках действующей процедуры экспертизы промышленной безопасности технических устройств на опасных производственных объектах, является не совершенной и не позволяет достоверно определить тип и количество развивающихся дефектов и предоставить достоверную оценку степени опасности их развития. Таким образом, создана ситуация, когда уровень развития программного и аппаратного обеспечения для контроля параметров вибрации на несколько порядков опережает возможности системы планово-предупредительных ремонтов. В таких условиях наиболее значимой и актуальной целью проводимых научных исследований является создание единого комплексного диагностического критерия, пригодного для выполнения эффективной оценки технического со-

стояния самого разного технологического оборудования [3, 4].

Основной целью настоящей работы является разработка единого диагностического критерия (ЕДК), основанного на результатах анализа параметров вибрации, генерируемой при работе оборудования центробежных насосов и пригодного для выполнения быстрой и эффективной оценки фактического технического состояния технологического оборудования.

Второй по значимости целью настоящего исследования является совершенствование методологических подходов к диагностике сложных механических систем, что позволит оптимизировать решение задачи по проблематике создания прогностических моделей деградации технического состояния узлов и агрегатов энерго-механического оборудования технических устройств, эксплуатируемых в условиях угольной и горнорудной отраслей промышленности.

В рамках настоящей работы впервые применен комплексный подход к выбору наиболее информативных диагностических характеристик центробежных насосов, что позволило наилучшим образом учесть специфику конструкции и особенности режимов работы оборудования, и, как следствие, обосновать эффективную оценку предельного состояния насосного оборудования.

Большинство из присутствующих на рынке программного обеспечения прогностических деградационных моделей, позволяющих выполнить прогнозирование изменения параметров технического состояния сложных механических систем по результатам анализа параметров генерируемой при их работе вибрации, являются несовершенными [5]. Данное несовершенство обусловлено малой областью применения, недостаточной апробацией результатов моделирования, ограниченным набором моделируемых параметров вибросигнала (обычно производители моделируют лишь величину общего

уровня вибрационного сигнала по параметру виброскорости). Все эти обстоятельства прямо указывают на актуальность исследований, проводимых по данной тематике.

Эффективная универсальная деградационная модель отсутствует на рынке по нескольким причинам, в частности из-за недостаточной изученности вопросов динамики горных машин и отсутствия представительных баз данных по параметрам вибрации однотипного динамического оборудования. Таким образом, только результаты комплексного подхода к анализу параметров исходных вибрационных характеристик и единые диагностические критерии оценки состояния (разработанные по числу основных дефектов оборудования и исключающие необходимость использования большого количества громоздких диагностических признаков и правил) позволят создать математическую деградационную модель качественно нового порядка, позволяющую с высокой степенью достоверности дать оценку техническому состоянию объекта диагностирования в кратко- и среднесрочной перспективе [6, 7, 8]. Причем наибольший практический интерес представляют именно результаты краткосрочного прогнозирования, позволяющие оценить вероятность безаварийной работы оборудования до момента проведения ближайшего ремонта, что является наиболее актуальным с учетом действующей на предприятиях угольной и горнорудной отраслей системы ППР. Для решения данной задачи наилучшим образом могут быть использованы алгоритмы адаптивного краткосрочного прогнозирования, корректирующие на основе предыдущих диагностических замеров параметры прогнозной модели и позволяющие рассчитывать эффективный прогноз на один или два диагностических периода. Анализ научной литературы подтвердил эффективность использования адаптивных экспоненциальных математических моделей для разработки краткосрочного прогноза [6, 8]. Основным недостатком существующих моделей такого типа можно считать малую область их применения и отсутствие данных об апробации на представительной выборке диагностических данных, полученных на различных типах элементов конструкций энерго-механического оборудования (в частности, горных машин, дробильно-сортировочного и угле-

обогатительного оборудования) [3, 5, 7, 8].

Кроме того, отдельного рассмотрения заслуживает вопрос создания гибкой системы фильтрации, позволяющей очистить спектр от «паразитного» шума различной природы, что позволит значительно увеличить область применения единых критериев оценки состояния [9, 10].

Полученные в рамках настоящего исследования данные основаны на результатах комплексного диагностического подхода, состоящего из нескольких различных методов обработки параметров исходных вибрационных характеристик, конкретное сочетание которых определялось только типом объекта исследования и режимами его работы [11]. В данном случае такой комплексный подход включает результаты спектрального анализа, эксцесса, анализа огибающей, вейвлет-преобразования исходного сигнала и некоторых других диагностических методов.

Обзор научных публикаций показал, что эффективных и подтверждавших свою адекватность деградационных моделей, основанных на моделировании наборов диагностических признаков по параметрам вибрации [12] и осуществляющих прогнозирование технического состояния сложных механических объектов, к которым относятся центробежные насосы, на сегодняшний день не существует [7, 9, 13, 14]. В то же время, существует большое количество научных трудов, посвященных разработке алгоритмов автоматизированного анализа информативных частот, генерируемых при работе объектов диагностики. Область применения таких алгоритмов, как правило, ограничена однотипными не сложными механическими объектами, требует наличия представительных баз данных для формирования индивидуальных частотных признаков дефектов; при этом данные алгоритмы отличаются достаточно низкой достоверностью результатов моделирования.

Проведенные исследования позволили обобщить результаты анализа вибрационных характеристик, генерируемых при работе центробежных насосов, разработать индивидуальные спектральные маски высокой степени детализации (см. рисунок 1), а также сгруппировать наиболее

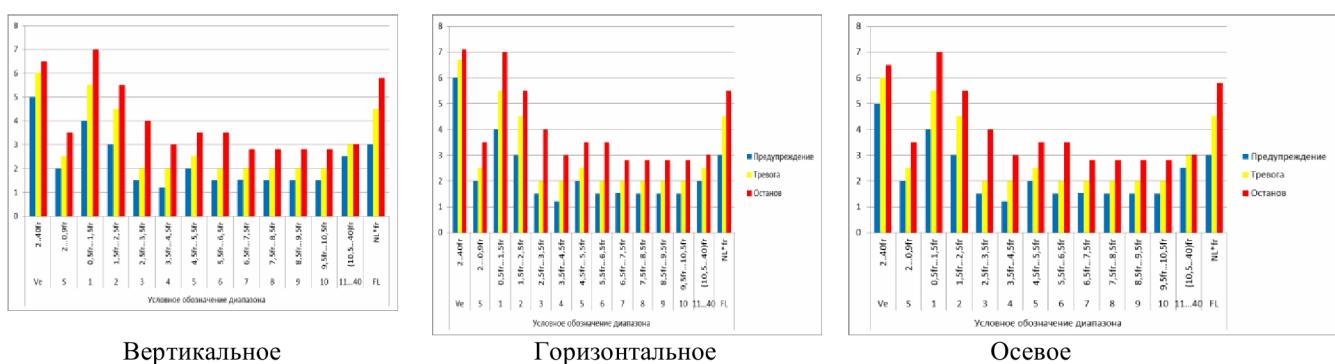


Рис. 1. Пример нормирования спектрального состава вибрационных характеристик, генерируемых при работе центробежных насосов Warman.

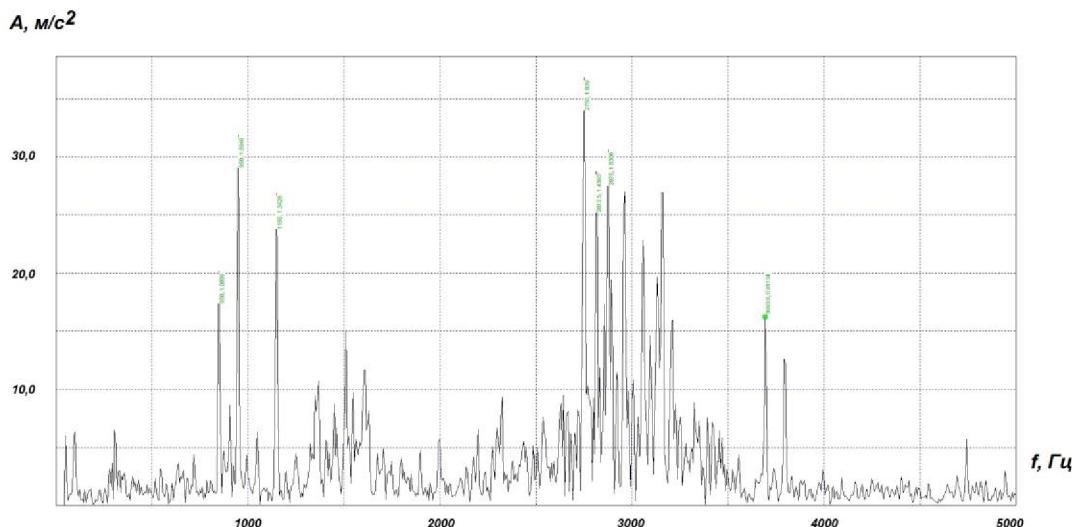


Рис. 2. Развитый дефект подшипника электродвигателя насоса ЦНС-180х128, нарушение жесткости системы.

распространенные дефекты данного оборудования по семи основным сегментам (нарушение жесткости системы, износ рабочих элементов насоса, дефекты ременных передач, нарушение соосности двигателя и насоса, разнообразные дефекты подшипников и нарушение режима их смазки, дефекты электрической природы и дисбалансы роторов электродвигателей), которым соответствует более ста диагностических признаков по параметрам вибрации (см. примеры спектров на рисунках 2, 3 и 4). Всего было предложено три основных типа спектральных опорных масок – для сигнализации вида «предупреждение», «тревога» и «останов» (с 75%, 85% и 95% доверительной вероятностью соответственно).

В данном случае (см. рис. 1) были рассчитаны индивидуальные предельные значения для каждой из четырнадцати частотных полос прямого спектра, полученные на основе анализа массива диагностических данных, сформированном при проведении измерений на выборке из двадцати единиц центробежных насосов. Наглядно показано, что совокупность значимых частотных составляющих не сосредоточена в какой-либо одной частотной области, а присутствует по всей ширине спектра. Результаты выполненного нормирования спектральных составляющих были использованы в качестве моделируемых пороговых значений диагностических параметров адаптивной прогностической модели, разрабатываемой для прогнозирования процесса деградации технического состояния насосных агрегатов.

Базовые диагностические признаки поиска развитых и зарождающихся дефектов насосных агрегатов были formalизованы для удобства их использования с целью разработки алгоритмического кода для автоматизированного контроля технического состояния сложных механических систем по параметрам генерируемых при их рабо-

те механических колебаний. Таким образом, были formalизованы около ста диагностических признаков, обобщение которых позволило приступить к разработке единого критерия оценки технического состояния объекта исследования. При этом проблематика диагностирования состояния трубопроводов гидравлической обвязки остается за рамками настоящего исследования.

Поиску единого критерия оценки по параметрам вибрации посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных авторов (например, [6, 8, 9, 15]), однако объектами исследований как правило становятся несложные механические узлы и элементы (это могут быть подшипники качения или скольжения или элементы крепежа опорной системы). Разработка достоверного прогноза для сложных механических систем и технических устройств с большим количеством конструктивных элементов является не в пример более сложной задачей и требует, как минимум, наличия представительных баз данных по однотипным объектам диагностирования. Как результат – такие системы остаются, как правило, за рамками большинства проводимых исследований.

Сегодня не существует единого диагностического критерия, пригодного для выполнения оценки фактического состояния насосного оборудования и основанного на результатах анализа параметров генерируемой при его работе вибрации. Для создания такого критерия в первую очередь необходимо выполнить formalизацию основных диагностических признаков наличия дефектов насосного оборудования [3, 7, 8, 9]. Главной задачей настоящей работы является решение проблематики по созданию совокупности оригинальных диагностических признаков и критериев (эффективных на всех этапах развития дефектов), при помощи которой появится возможность извлечения максимума ценной диагностической ин-

формации из виброакустических волн, формирующихся при работе насосных агрегатов.

Обобщение результатов выполненных исследований позволило сформировать восемь базовых диагностических признаков оценки состояния по параметрам вибрации, пригодных для создания единого диагностического критерия оценки и прогнозирования технического состояния оборудования центробежных насосов:

1. Нормированный общий уровень сигнала и пиковое значение по параметру виброускорения в диапазоне 50...5 000 Гц;

2. Общий уровень сигнала и уровень составляющих подшипниковых частот по параметру виброскорости (2...3000 Гц);

3. Общий уровень по параметру виброскорости в низкочастотном диапазоне ($2\text{Гц} \dots 15f_{\text{р1}}$), содержащий признаки нарушения жесткости системы, неуравновешенности элементов электродвигателя и центробежного насоса, наличия несоосности шкивов ременной передачи.

4. Гармоническая активность на ременной частоте, ее гармониках и обертонах ($f_{\text{ремня}} = f_{\text{ш}} \cdot \pi \cdot D/L$, где D – диаметр шкива, мм; L – длина ремня, мм; $f_{\text{ш}}$ – оборотная частота шкива, Гц), вызываемая дефектами ременных передач (растresкивание, биение, перекручивание ремней и т.д.).

5. Глубина модуляции спектра огибающей вибросигнала в области подшипниковых частот, а также величина флюктуации амплитуд соответствующих гармоник – базовых, промежуточных и модуляционных частот.

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

7. Неоднородность потока жидкости в проточной части центробежных насосов, проявляющаяся на лопаточных частотах, их субгармониках и обертонах, а также боковых и модуляционных частотах, наиболее ярко выраженных в горизонтальной плоскости

проведения измерений и являющаяся следствием эксплуатационного износа рабочего колеса и лопаток (раковины, неравномерная толщина лопаток, каверны, трещины).

8. Инфразвуковые колебания в диапазоне 1-4 Гц, обусловленные пульсацией потока жидкости, приводящие к ускоренному износу уплотнений насоса.

Неравномерный износ лопаток рабочих колес центробежных насосов неизбежно приводит к возникновению дисбаланса вращающихся элементов насоса и генерации в спектре гармоник ряда оборотной частоты ротора, лопаточных, боковых и модуляционных составляющих. В литературе не приводятся достоверные данные о взаимосвязи величин параметров генерируемой вибрации на приведенных выше частотах и степенью износа поверхностей рабочего колеса и лопаток, данная зависимость до сих пор не установлена. К сожалению, решение этой задачи оказалось за рамками настоящей работы, т.к. используемая выборка из двадцати центробежных насосов является недостаточной для получения требуемого объема статистической информации, принимая во внимание особенности режимов работы и состояние оборудования (цикличность, нагрузки, степень износа и т.д.).

Результаты проведенных исследований параметров вибрации, генерируемой при работе насосного оборудования, позволили сделать вывод о целесообразности использования комплексного диагностического подхода для оценки и прогнозирования его фактического технического состояния. В частности, результаты комплексного подхода к диагностике по параметрам механических колебаний, реализованного в рамках выполнения настоящей работы, позволили выявить динамику развития дефектов узлов и элементов насосного оборудования и подтвердить результаты проведенного спектрального анализа. Результаты выполненного анализа диагностических па-

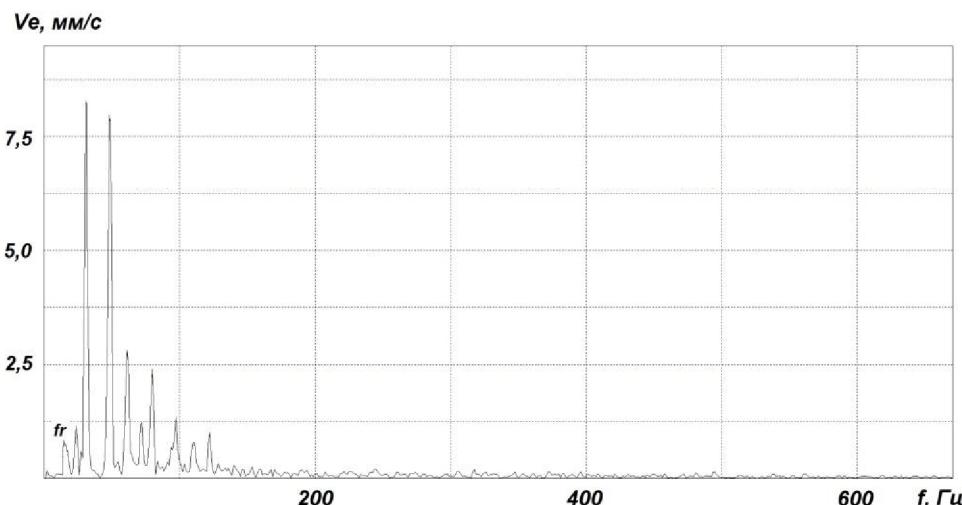


Рис. 3. Ярко выраженное нарушение соосности шкивов ременной передачи насоса Warman 150/100 CMU.

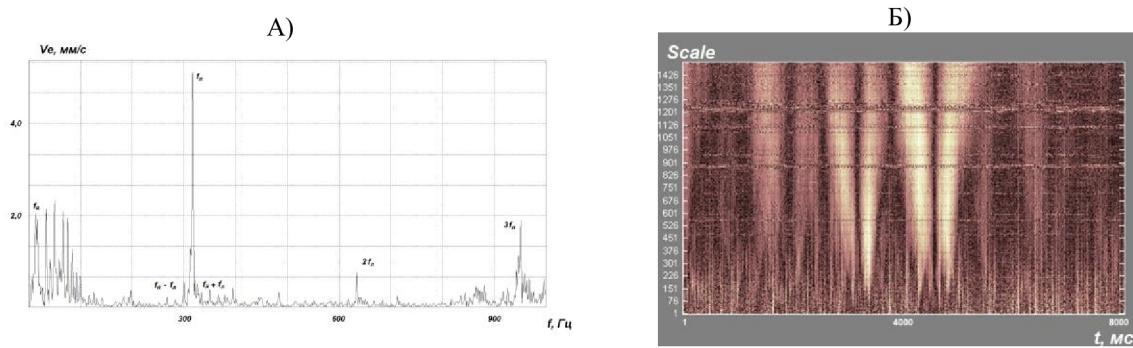


Рис. 4. Спектр по параметру виброскорости в стандартном частотном диапазоне (А) и результаты вейвлет-преобразования виброакустической волны (Б), свидетельствующие о наличии множественных развитых дефектов (каверн) на поверхности лопаток рабочего колеса центробежного насоса ЦН400-210а, нарушении жесткости системы.

раметров разнообразного энерго-механического оборудования [5, 6] позволили сделать вывод о том, что комплексный подход к диагностике сложных механических систем по параметрам генерируемой при их работе вибрации должен опираться на результаты спектрального анализа по параметрам виброскорости и виброускорения в расширенном частотном диапазоне, анализ огибающей и эксцесс. Специфика конструкции и особенности режимов работы центробежных насосов, эксплуатируемых в условиях угольной и горнорудной отраслей промышленности Кузбасса, предъявляют определенные требования к применяемому комплексному диагностическому подходу – так, например, в рамках настоящей работы здесь впервые была обоснована эффективность применения результатов вейвлет-преобразования для оценки состояния насосного оборудования (см. рисунок 4). Кроме того, эффективные единые критерии оценки состояния оборудования насосных агрегатов, необходимые для разработки адекватных деградационных моделей объектов диагностирования, могут быть основаны только на результатах комплексного подхода к анализу параметров виброакустических волн, генерируемых при работе технологического оборудования. Причем, создаваемые ЕДК должны основываться на результатах анализа параметров исходных характеристик с применением как минимум четырех описанных выше диагностических подходов, что подтверждается работами ряда других авторов [8, 12, 15].

Отдельного внимания заслуживает рассмотрение задачи, связанной с очисткой спектра от «лишних» гармоник, т.е. реализация процедуры клиппирования. Применяемые алгоритмы клиппирования обязательно должны содержать распространенную в вибродиагностике процедуру уточнения оборотной частоты вращения, основанную на принципе поиска в низкочастотном диапазоне спектра гармоник с максимальными ампли-

тудами. При этом необходимо понимать, что центробежные насосы относятся к объектам с неявными максимумами оборотной частоты, для диагностирования которых наилучшим образом может использоваться процедура клиппирования, описанная в работах [8]. Единый диагностический критерий, с помощью которого наиболее эффективно можно осуществить оценку фактического состояния однотипных объектов, должен быть разработан с применением многомерного пространства диагностических признаков при помощи алгоритмов скаляризации [8, 14], включающих пошаговую сегментацию групп объектов с различной степенью развития дефектов. В этом случае количество разрабатываемых ЕДК должно равняться числу групп дефектов (по одному ЕДК для дефектов подшипников, нарушения центровки, нарушения жесткости системы, дефектов соединительных муфт, дефектов рабочих элементов насосов и т.п.).

Решение задачи по разработке единых диагностических критериев, которые могут быть применены в качестве базовых моделируемых параметров [13, 14] при создании адаптивных деградационных моделей (наилучшим образом подходящих для условий действующей на предприятиях отрасли системы планово-предупредительных ремонтов), является одним из основных критериев успешного внедрения системы обслуживания горной техники по ее фактическому состоянию, что подтверждает актуальность предложенного алгоритма создания ЕДК. Кроме того, применение результатов, полученных на адаптивных деградационных моделях, ориентированных на прогнозирование параметров разрабатываемых ЕДК для сложных механических систем, позволит свести к минимуму складские и транспортные издержки предприятий [15], предотвратить аварийные выходы из строя оборудования, повысить безопасность труда обслуживающего и ремонтного персонала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 53565-2009. Национальный стандарт Российской Федерации. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов.
2. РД 15-04-2006. Методические указания по проведению экспертизы промышленной безопасности ленточных конвейерных установок.
3. Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков. Ещеркин П.В., автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово – 2012 год. – 18 с.
4. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press, 2002, P.726.
5. Герике П.Б. Разработка единого критерия оценки для диагностики оборудования дизель-гидравлических буровых установок /П.Б. Герике// Вестник КузГТУ, № 4. – Кемерово. – 2016. – С. 71-78.
6. S. Delvecchio, G. DElia, E. Mucchi, G. Dalpiaz, 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, ISSN: 1048-9002, doi:10.1115/1.4000807
7. Разработка стационарного диагностического комплекса для экскаватора типа ЭКГ. Дрыгин М.Ю., автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово – 2012 год. – 20 с.
8. Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем. Дисс. ... канд. техн. наук. – М. – МИФИ. – 2007. – 170 с.
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. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / Ширман А.Р., Соловьев А.Б. / Москва, 1996. – 276 с.
11. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005. – 828 с.
12. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. / Иркутск: Издательство ИрГТУ, 1999. – 230 с.
13. Герике П.Б. Анализ параметров виброакустических волн, содержащих признаки наличия дефектов электрической природы, на примере энерго-механического оборудования экскаваторов ЭКГ /П. Б. Герике// Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности, №3. – Кемерово. – 2016. С. 52-57.
14. Krakovskiy, Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. / Новосибирск: Наука, 2006. – 227 с.
15. 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, vol. 134(18) - 2012

REFERENCES

1. GOST R 53565-2009. Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Vibratsiya tsentrobereznykh nasosnykh i kompressornykh agregatov. [Condition monitoring and diagnostics of machines. Hazardous equipment monitoring. Vibration generated by rotodynamic pump and compressor units]. Moscow, 2010. 10 p. (rus)
2. RD 15-04-2006. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu eksperitzy promyshlennoy bezopasnosti lentochnykh konveyernykh ustanovok [Methodical recommendations on how to conduct the examination of industrial safety of belt conveyor systems]. Moscow, 2006. 56 p. (rus)
3. 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)
4. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press, 2002, P.726.
5. Gericke P.B. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2016. #4. Pp. 71-78. (rus)
6. S. Delvecchio, G. DElia, E. Mucchi, G. Dalpiaz, 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, ISSN: 1048-9002, doi:10.1115/1.4000807 (eng)
7. Drygin M.Yu. Razrabotka statcionarnogo diagnosticheskogo kompleksa dlya ekskavatora tipa EKG [Development of a stationary diagnostic system for an mining shovel ECG-type]: PhD thesis excerpt. Kemerovo. 2012. (rus)

8. 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)
9. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA. (eng)
10. 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)
11. 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)
12. Luk'yanov A.V. Klassifikator vibrodiagnosticheskikh priznakov defektov rotornykh mashin [The classifier of vibrodiagnostic symptoms of defects rotary machines.]. Irkutsk, 1999. – 230 p. (rus)
13. Gericke P.B. Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti. 2016. #3. Pp. 52-57. (rus)
14. Krakovskiy, Yu. M. Matematicheskie i programmnye sredstva otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya [Mathematical and software evaluation of the technical state of equipment]. Novosibirsk, 2006. – 227 p. (rus)
15. 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, vol. 134(18) – 2012 (eng)

Поступило в редакци. 16.11.3016
Received 16 November 2016