

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 53.083(430.1)

ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРИВОДНЫХ СТАНЦИЙ СКРЕБКОВЫХ КОНВЕЙЕРОВ

IDENTIFICATION OF DEFECTS IN EQUIPMENT OF SCRAPER CONVEYORS

Герике Павел Борисович,
кандидат техн. наук, доцент, e-mail: am_besten@mail.ru
Gericke Pavel B., C.Sc., Associate Professor

Федеральный Исследовательский Центр угля и углехимии СО РАН

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

Аннотация. Данная работа посвящена проблематике диагностирования технического состояния энерго-механического оборудования скребковых конвейеров по результатам анализа параметров механических колебаний, генерируемых при его работе. Обоснована эффективность применения результа-ттов комплексного диагностического подхода для выявления базовых дефектов, находящихся на различной стадии своего развития, приведена подробная классификация неисправностей и повреждений диагностируемого оборудования. Результаты работы позволили создать авторский комплекс из более чем ста диагностических правил, предназначенный на автоматизированного выявления основных дефектов оборудования на основе анализа селективных групп информативных частот. Доказано, что только с широким применением современных методов вибрационной диагностики и неразрушающего контроля появляется возможность для эффективного выявления дефектов дробильно-сортировочного, углеобогатительного и горно-транспортного оборудования, а также для разработки адекватных математических моделей деградации технического состояния. Доказана принципиальная возможность создания группы единых диагностических критерии, пригодных для осуществления оценки технического состояния скребковых конвейеров и являющихся необходимым условием для осуществления эффективного краткосрочного прогнозирования исследуемых параметров при разработке адаптивных математических моделей. Предложенные диагностические подходы могут быть использованы в качестве базовой платформы для совершенствования системы обслуживания эксплуатируемой техники. Результаты проведенных исследований безапелляционно доказывают принципиальную необходимость внедрения на предприятиях угольной и горнорудной отраслей промышленности системы обслуживания техники по её фактическому техническому состоянию.

Abstract. This paper deals with the problems of diagnosing of a technical condition of energy-mechanical equipment conveyors according to the analysis of parameters of mechanical vibrations generated during its work. The obtained data allowed to substantiate the effectiveness of the results of an integrated diagnostic approach to identify the basic defect at different stages of development, provides detailed classification of faults and damage diagnosed equipment. The results allowed the authors to create a complex of more than one hundred of diagnostic rules, designed to identification of the main defects on the basis of the analysis of informative frequency equipment. It is proved that only with the widespread use of modern methods of vibration diagnostics and nondestructive testing it is possible to effectively identify defects of crushing and screening, coal enrichment and mining equipment, as well as to develop adequate mathematical models to predict the changes in the technical conditions. Proved in principle the possibility of creating a group a unified diagnostic criteria suitable for evaluation of the technical state of conveyors and is a prerequisite for effective short-term forecasting of the tested parameters in the development of adaptive mathematical models. The proposed diagnostic approaches can be used as a base platform for improving system maintenance of mining equipment. The results of these research are categorically demonstrate the need the introduction of service system for its actual technical condition for the coal and mining industries.

Ключевые слова: вибродиагностика, скребковый конвейер, неразрушающий контроль, энерго-механическое оборудование, управление техническим обслуживанием.

Keywords: vibration analysis, scraper conveyor, nondestructive testing, energomechanical equipment, maintenance management.

Около одной трети от среднесписочного количества технологического оборудования, эксплуатируемого на обогатительных фабриках и установках Кузбасса и подпадающего под процедуру экспертизы промышленной безопасности, находится в недопустимом техническом состоянии, причем дальнейшая эксплуатация этой техники зачастую приводит к возникновению нештатных аварийных ситуаций и значительным неплановым простоям. Такие данные удалось получить в рамках проведения технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности технических устройств на опасных производственных объектах. Учеными и специалистами ФИЦ УУХ СО РАН и ФГБОУ ВО «КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева» были проведены работы по вибродиагностическому контролю оборудования ряда обогатительных фабрик Кузбасса (ООО «Шахта Листвяжная» ОФ «Листвяжная», ОАО ЦОФ «Беловская», ЗАО «ОФ «Распадская», ОФ «Кедровская», ПАО «Разрез Виноградовский» ОФ «Каскад» и др.). В качестве объекта данного исследования выбраны скребковые конвейера, диагностические измерения проводились на предельно изношенном оборудовании, работающем в тяжелых эксплуатационных условиях (предельные нагрузки; ремонты с использованием восстановленных запасных частей; загрязнения смазки подшипников и зубчатых передач; значительные перепады температуры и т.д.).

В качестве базового метода для оценки технического состояния технических устройств был выбран вибродиагностический контроль, как наиболее информативный метод, позволяющий дать объективную оценку техническому состоянию работающего агрегата [1, 2]. В рамках настоящей работы впервые применен комплексный подход к анализу параметров вибрационных волн, генерируемых при работе скребковых конвейеров, и выбору наиболее информативных диагностических характеристик.

Результаты исследования позволили наилучшим образом учесть специфику конструкции и особенности режимов работы оборудования, и, как следствие, обосновать эффективные критерии оценки предельного состояния объектов диагностирования.

Экспериментальные данные, полученные в рамках выполнения данной работы, основаны на результатах комплексного диагностического подхода, состоящего из нескольких различных методов обработки параметров исходных полигармонических волн.

В данном конкретном случае комплексный подход включает результаты спектрального и кепстрального анализа, эксцесс и анализ огибающей.

Такое сочетание методов виброанализа обусловлено некоторыми особенностями конструкции диагностируемого оборудования (наличие редукторов переборного типа и подшипников качения) и режимами его работы (низкая частота вращения приводного барабана, малая периодичность циклов работы скребкового конвейера).

Некоторые примеры анализа параметров вибрационных волн, генерируемых при работе энерго-механического оборудования скребковых конвейеров, представлены ниже на рис. 1.

Здесь приведены спектры по параметрам виброскорости и виброускорения в стандартном и расширенном частотном диапазоне, содержащие признаки наличия дефектов, наиболее распространенных на данном типе диагностируемого оборудования, таких как: нарушение центровки электродвигателей с редукторами и редукторов с приводными барабанами, повреждения зубчатых передач редукторов (несоосность валов, износ и выкрашивание зубьев), дефекты подшипников качения, неуравновешенность ротора электродвигателя, нарушение жесткости системы и дефекты соединительных муфт).

Причины формирования и ускоренного развития данных дефектов разнообразны, часть из них закладывается еще на стадии проектирования или изготовления, другие являются следствием не квалифицированно проведенного монтажа или ремонта, третья группа дефектов – эксплуатационные, проявляющиеся в результате длительной работы с нагрузками, нередко превышающими расчетные.

Использование результатов комплексного диагностического подхода позволяет минимизировать ограничения на область применения того или иного конкретного метода вибродиагностики (такие как: низкие частоты вращения вала, знакопеременные ударные нагрузки, источники случайной высокочастотной вибрации, отсутствие сведений о геометрических параметрах подшипника и/или кинематике механизма и т.д. [3, 4]). Таким образом, именно обоснованный комплексный подход к анализу параметров механических колебаний позволяет извлечь максимум ценной диагностической информации из исходных полигармонических волн и дать достоверную оценку фактическому состоянию работающего агрегата.

Специфика проведения диагностических измерений в условиях предприятий угольной и горнорудной промышленности предъявляет свои требования к применяемой аппаратуре – расширенный частотный и динамический диапазон измерений, минимум два измерительных тракта, максимальное количество аппаратно реализованных методов проведения контроля,

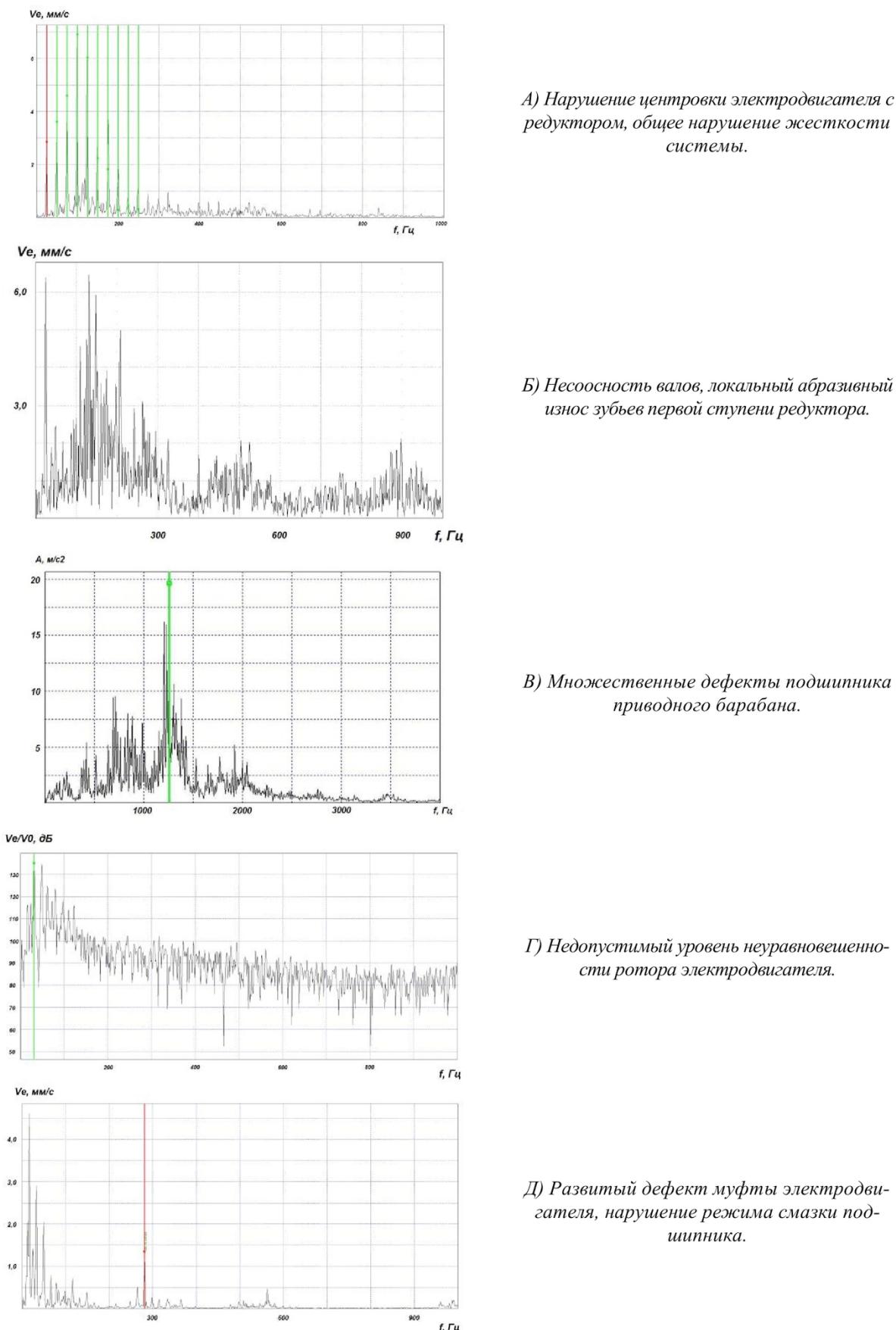


Рис. 1. Наиболее типичные дефекты энерго-механического оборудования приводной станции скребкового конвейера.

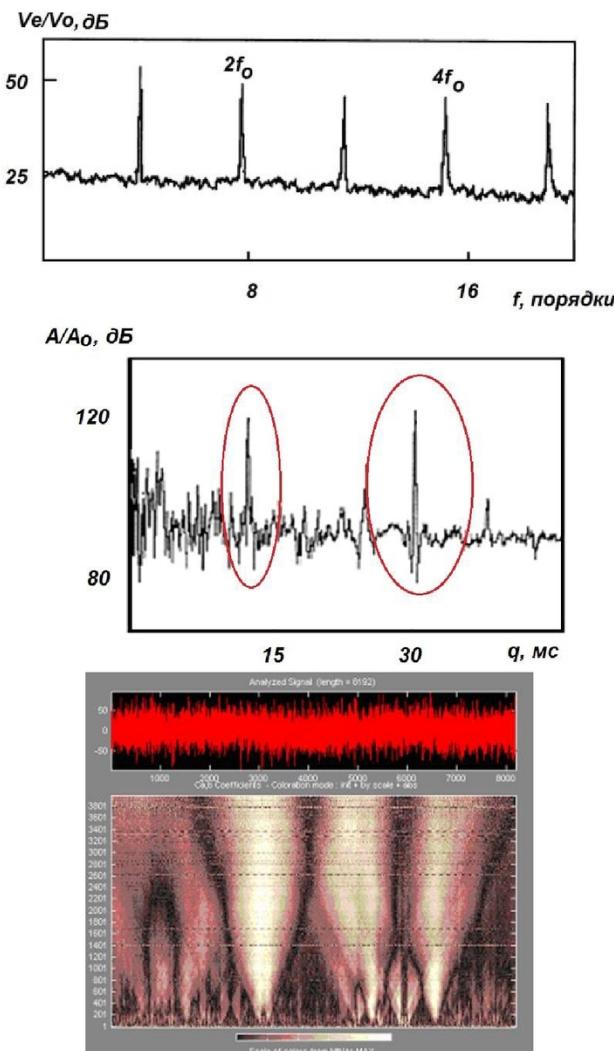


Рис. 2. Результаты выявления дефектов энерго-механического оборудования скребкового конвейера с применением комплексного диагностического подхода.

пылевлагостойкое исполнение – искровзрывобезопасное исполнение цельнофрезерованного корпуса, рабочий температурный режим от -20 до +50 °C, увеличенный объем памяти, малый вес, надежность соединений в системе «датчик-кабель-прибор» [5].

Отдельной научной задачей при проведении настоящего исследования была разработка диагностических моделей развития основных дефектов различного энерго-механического оборудования. Созданные базы данных по параметрам вибрационного сигнала были использованы при разработке математической модели, описывающей деградацию технического состояния подшипников электродвигателя скребкового конвейера В-1600 (за основу был принят алгоритм создания прогнозной модели, предложенной в работах [8]). В полной мере решить поставленную научную задачу можно только при условии создания большого числа прикладных деградационных моделей развития дефектов для широкого

А) Спектр огибающей вибросигнала, содержащий признаки наличия раковины наружного кольца подшипника электродвигателя.

Б) Кепстр зубчатой пары редуктора с развитым питтингом зубчатых колес.

В) Исходная полигармоническая волна и результаты ее вейвлет-преобразования, свидетельствующие о начальной стадии локального абразивного износа зубьев.

типового и номенклатурного ряда горно-шахтного оборудования, что, в свою очередь, позволит своевременно обеспечить ремонтные службы эксплуатирующих предприятий запасными частями для ремонта оборудования, решить проблемы снабжения и логистики, избежать длительных аварийных простоев сложной дорогостоящей техники, повысить эффективность управления техническим обслуживанием и ремонтом.

На сегодняшний день в мировой практике в области программного обеспечения для вибранализа отсутствует универсальная прогностическая модель, комплексно описывающая процесс деградации технического состояния сложной механической системы. Такая ситуация сложилась по нескольким причинам – главными из которых, безусловно, являются следующие:

- недостаточная изученность вопросов динамики горных машин;
- сложность формализации большого количества диагностических признаков наличия дефектов, определяемая спецификой методологии алгоритмов поис-

ка дефектов при помощи различных диагностических подходов;

- отсутствие достаточных по объему представительных баз данных по параметрам вибрации для однотипного энерго-механического оборудования.

Доказано [6, 7, 8], что только результаты комплексного подхода к анализу параметров вибрации, генерируемой при работе диагностируемого оборудования, и единые диагностические критерии (ЕДК), пригодные для выполнения оценки состояния и исключающие необходимость использования большого количества громоздких диагностических признаков и правил, позволяют создать адекватную эффективную математическую деградационную модель. Особенностью такой модели станет высокая степень достоверности прогноза по изменению технического состояния объекта диагностирования в кратко- и среднесрочной перспективе [9]. Специфика системы планово-предупредительных ремонтов предъявляет к разрабатываемым моделям свои требования, в частности, пропадает практическая необходимость в использовании алгоритмов долгосрочного прогнозирования [10, 11]. В созданных условиях наибольший практический интерес представляют именно результаты краткосрочного прогнозирования, позволяющие оценить вероятность безаварийной работы оборудования до момента проведения ближайшего ремонта. Наиболее эффективно здесь могут применяться алгоритмы адаптивного краткосрочного прогнозирования [12, 13, 14], особенностью которых является адаптация к быстро меняющимся внешним параметрам (входным данным), т.е. осуществление корректировки параметров математической модели на основании предыдущих диагностических замеров, что позволяет в конечном итоге осуществить эффективный прогноз на один - два периода диагностики. Главным и достаточно серьезным недостатком моделей такого типа является их область применения, ограниченная несложными механическими объектами [5, 7, 8]. Исследования [8, 9] показали, что использование результатов нормирования составляющих полигармонических колебаний при помощи спектральных масок высокой степени детализации может быть эффективным при моделировании пороговых значений диагностических параметров адаптивной прогностической модели, разрабатываемой для прогнозирования процесса деградации технического состояния насосных агрегатов, что в конечном итоге приведет к расширению области применения таких математических моделей. Одним из оперативных алгоритмов, способных повысить эффективность результатов диагностики и точность разрабатываемых спектральных масок, является уточнение оборотной частоты вращения вала [8, 11]. Подобные алгоритмы наряду с большим количеством диагностических признаков и правил выявления дефектов энерго-механического оборудования могут с успехом применяться для разработки спектральных масок с высокой степенью детализации, однако при смене объекта ди-

агностирования работу по нормированию составляющих спектра и созданию масок необходимо начинать заново.

Результаты осуществленного комплексного анализа диагностических параметров позволили формализовать базовые диагностические признаки, необходимые для поиска развитых и зарождающихся дефектов энерго-механического оборудования приводных станций скребковых конвейеров. Таким образом, в рамках настоящего исследования были formalизованы около ста диагностических признаков, обобщение которых позволило приступить к разработке единого критерия оценки технического состояния и созданию алгоритмического кода для автоматизированного контроля технического состояния сложных механических систем по параметрам генерируемой при их работе вибрации.

Анализ отечественных и зарубежных публикаций [6, 8, 9, 15] позволяет заключить, что вопросам создания ЕДК в области оценки технического состояния по параметрам вибрации удалено достаточно внимания. Однако, общим недостатком разрабатываемых критериев является тот факт, что областью их применения остаются одиночные несложные элементы конструкции оборудования, вопросы динамики которых хорошо изучены (как правило, это подшипники качения или элементы крепежа опорной системы). Создание ЕДК для разработки достоверного прогноза изменения технического состояния сложных механических систем (к которым относят дробильно-сортировочное, горно-транспортное и углеобогатительное оборудование) является гораздо более сложной задачей. Одной из основных трудностей разработки адекватных ЕДК является отсутствие представительных баз данных по однотипным объектам диагностирования, анализ которых позволил бы сформулировать диагностические критерии для предельно изношенного оборудования и выявить предпосылки для создания единого критерия оценки состояния технических устройств. Помимо других преимуществ, предоставляемых совершенствуемой диагностической методологией, алгоритмическая реализация прогностических адаптивных деградационных моделей, основанных на моделировании параметров ЕДК по параметрам вибрации и предназначенных для прогнозирования состояния сложных механических систем позволит свести к минимуму складские и транспортные издержки предприятий, предотвратить аварийные выходы из строя оборудования, повысить безопасность труда обслуживающего и ремонтного персонала.

Анализ результатов, полученных лично автором настоящего исследования, позволил сформировать семь базовых диагностических признаков оценки состояния по параметрам генерируемой вибрации, пригодных для создания единого диагностического критерия оценки и прогнозиро-

ния технического состояния энергомеханического оборудования приводных станций скребковых конвейеров:

1. Общий уровень и пиковье значения отдельных максимальных по амплитуде гармоник по параметру виброускорения в диапазоне 50...5000 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 (2Гц ... 15f_{ri}), содержащий признаки нарушения жесткости системы, неуравновешенности вращающихся деталей электродвигателя и редуктора.

4. Глубина модуляции спектра огибающей вибrosигнала в области подшипниковых частот, а также величина флуктуации амплитуд соответствующих гармоник – базовых, промежуточных и модуляционных частот.

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

6. Глубина модуляции спектра огибающей вибrosигнала в области зубчатых частот редуктора, а также флуктуация амплитуд соответствующих гармоник;

7. Результаты нормирования параметров вибрации при помощи спектральных масок высокой степени детализации, разработанных для широкого спектра энерго-механического оборудования.

Проведенные исследования позволили разработать единые критерии, основанные на обобщении данных базовых признаков, по одному ЕДК для дефектов подшипников качения, зубчатых передач и электродвигателей, используемых в конструкциях скребковых конвейеров. Применительно к данному типу оборудования такие исследования проводились впервые. При разработке ЕДК использовался метод «оптимальной скаляризации», в основе которого находится принцип замены вектора диагностических признаков на ска-

лярную величину с использованием критерия разделяемости объектов на две большие группы в зависимости от их технического состояния. Так, в группу А попали объекты, фактическое состояние которых можно оценить как «хорошее», «удовлетворительное» и «допустимое». А к группе Б относились объекты с «предельно допустимым» или «недопустимым» фактическим состоянием.

Точность создаваемой модели удалось повысить уменьшением периода прогнозирования (максимум 2 – 3 диагностических периода) и увеличением числа экспериментальных данных, полученных на однотипных объектах диагностирования с одинаковыми режимными эксплуатационными характеристиками.

Необходимым условием решения задачи по оценке и прогнозированию остаточного ресурса сложных механических систем является наличие эффективных способов выделения трендов детерминированной составляющей сигналов для выполнения краткосрочного прогнозирования изменения технического состояния объекта. ЕДК, который может быть наилучшим образом использован для выполнения оценки состояния только одного типа объектов, наиболее эффективно может быть описан в многомерном пространстве диагностических признаков при помощи алгоритмов скаляризации [8, 15], причем данный алгоритм должен учитывать распределение объектов на различные группы, в зависимости от степени развития дефектов и повреждений.

Очевидно, что должно быть создано несколько единиц критериев, по одному на каждую группу дефектов. Так, для оценки и прогнозирования изменения технического состояния оборудования приводных станций скребковых конвейеров необходимо было разработать индивидуальные ЕДК для подшипников, дефектов линии вала, дисбалансов, дефектов соединительных муфт, зубчатых колес.

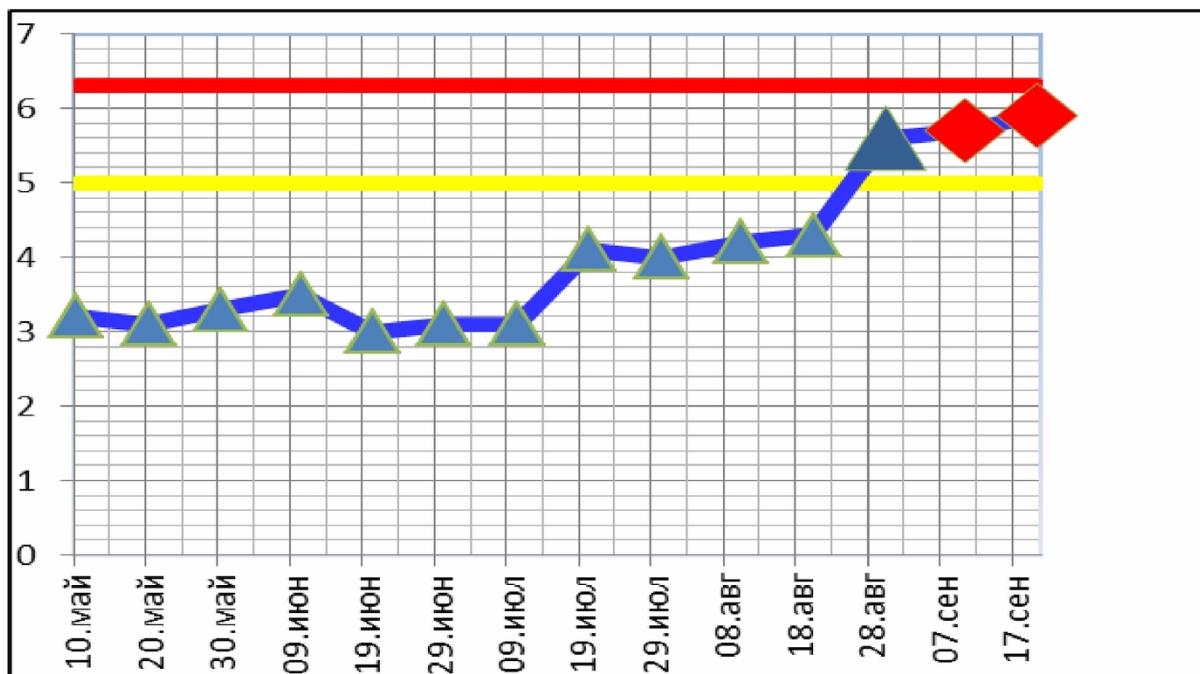


Рис. 3. Результаты прогностического моделирования с использованием аддитивной модели.

Алгоритм создания ЕДК для каждого из базовых дефектов, присущих объекту исследования, должен предусматривать процедуру клиппирования, необходимую для удаления из спектра «лишней» информации. Кроме того, необходимо было предусмотреть процедуру детектирования и удаления искаженных диагностических данных, появление которых вызвано несколькими причинами, среди которых: погрешности интегрирования программного обеспечения, ошибки при установке датчика, дефекты соединения системы «датчик – кабель – прибор», значительные ослабления фундамента работающего агрегата.

Для решения этих задач в работе использована операция модифицированного поэтапного клиппирования, предложенная в исследованиях [8], предусматривающая осуществление клиппирования модифицированного (сглаженного) спектра, проходящее в несколько этапов. В результате чего каждый результатирующий модифицированный спектр может быть представлен в виде суммы специфических (зубцовых, подшипниковых и др.) частот $\alpha(f)$ и компонент, независимых от частоты вращения вала $X(f)$.

Пример реализации аддитивной модели, моделирующей изменение ЕДК, разработанного для выявления дефектных подшипников, представлен на рисунке 3. Здесь в качестве объекта исследования выступил подшипник электродвигателя скребкового конвейера со стороны редуктора. Согласно осуществленному прогнозу, объект безаварийно отработал два интервала моделирования до планируемого годового ремонта, на котором была осуществлена его замена. Результаты визуального контроля разобранного подшипникового узла подтвер-

дили результаты моделирования – выявлены раковины тел качения, наклеп сепаратора и трещина внешнего кольца подшипника. Фактическое техническое состояние объекта диагностирования было признано недопустимым на момент проведения последнего замера (30.08.2015), однако подшипник качения смог безаварийно отработать в течение прогнозируемого временного интервала.

Таким образом, результатами настоящего исследования убедительно подтверждено, что предложенный подход к совершенствованию методологии диагностирования сложных механических систем и комплексной оценке их технического состояния, а также разработанные единые диагностические критерии состояния техники и математические модели развития дефектов энерго-механического оборудования могут быть использованы в качестве элементов базовой платформы для внедрения качественно новых форм технического обслуживания в условиях угольной и горнорудной промышленности Кузбасса, которой необходим переход от устаревшей системы планово-предупредительных ремонтов оборудования и «аварийного» обслуживания. Внедрение системы обслуживания техники по ее фактическому состоянию потребует наличия развитых программно-математических методов прогнозирования и контроля технического состояния [13], разработка которых является одной из целей настоящего исследования. Результатом практического использования результатов предложенного подхода станет максимально безопасная эксплуатация горных машин и оборудования, эффективная система планирования ремонтов и достоверной оценки остаточного ресурса, минимизация аварийных простоев дорогостоящей техники,

уменьшение числа несчастных случаев на производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trebuna F., Šimcak F., Bocko J., Hunady R., Pastor M. «Complex approach to the vibrodiagnostic analysis of excessive vibration of the exhaust fan», Engineering Failure Analysis #37 (2014). 86–95
2. Puchalski A. «A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», Mechanical Systems and Signal Processing #56-57(2015). 173–180
3. 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. Контроль технического состояния буровых установок серии DML по параметрам механических колебаний /П. Б. Герике// Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности, №1. – Кемерово. – 2014. С. 28-32.
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. V. Pozhidaeva. Determining the roughness of contact surfaces of the rolling bearings by the method of shock pulses. World Tribology Congress III, September 12-16, 2005, Washington, D.C., USA
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. Насосное оборудование обогатительных фабрик Кузбасса – как объект диагностики технического состояния /П. Б. Герике// Вестник КузГТУ, № 5. – Кемерово. – 2013. – С. 114-116.
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. Trebuna F., Šimcak F., Bocko J., Hunady R., Pastor M. «Complex approach to the vibrodiagnostic analysis of excessive vibration of the exhaust fan», Engineering Failure Analysis #37 (2014). Pp. 86–95 (eng)
2. Puchalski A. «A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», Mechanical Systems and Signal Processing #56-57(2015). Pp. 173–180 (eng)
3. Eshcherkin P.V. Razrabotka metodiki diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya dizel'-gidravlicheskikh burovyykh 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. (eng)
5. Gericke P.B. Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti. 2014. #1. Pp. 28-32. (rus)
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, ISSN: 1048-9002, doi:10.1115/1.4000807 (eng)
7. V. Pozhidaeva. Determining the roughness of contact surfaces of the rolling bearings by the method of shock pulses. World Tribology Congress III, September 12-16, 2005, Washington, D.C., USA (eng)

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 Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2013. #5. Pp. 114-116. (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 редакцию 8.02.2017

Received 8.02.2017