

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ 4.0 — ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ РЕСУРСА МАШИН



Николай Ишин,
начальник научно-технического
центра «Карьерная техника»
Объединенного института
машиностроения НАН Беларуси,
доктор технических наук, доцент



Владимир Адашкевич,
заведующий отраслевой
лабораторией по исследованиям,
проектированию и испытаниям
электромобилей и базовых
компонентов электропривода
Объединенного института
машиностроения НАН Беларуси



Аркадий Гоман,
начальник отдела динамического
анализа и вибродиагностики
машин Объединенного института
машиностроения НАН Беларуси,
кандидат технических наук, доцент



Андрей Скороходов,
ведущий научный сотрудник
Объединенного института
машиностроения НАН Беларуси,
кандидат технических наук

На протяжении многих лет вибрационный анализ является основным методом, используемым для диагностики и мониторинга технического состояния вращающихся узлов машин. Они, как правило, оснащены множеством датчиков, однако их показатели сами по себе ничего не дают — результат появляется, когда обработанная информация объединяется с данными управления сервисом. Если добавить еще финансовые затраты, то можно спрогнозировать расходы на будущие работы по техническому обслуживанию ТСИ [1].

Концепция «Мониторинг состояния 4.0» в практике диагностики

Концепция Индустрии 4.0 оказала глубокое влияние на практику вибродиагностики, и промышленность быстро включила ее принципы в разработку стратегии Мониторинга состояния 4.0 [2]. Его ключевое преимущество — повышение качественного уровня мониторинга и надежности ТСИ за счет имеющихся ресурсов. Внедрение таких новшеств, как интеллектуальные беспроводные

датчики и автоматический анализ данных в сочетании с веб-интерфейсами, позволяет значительно повысить эффективность работы СМС. Новые инструменты интуитивно понятны и могут одновременно взаимодействовать с несколькими системами и терминалами. Таким образом, получение точных данных и упрощение их обработки – это два критических требования Мониторинга состояния 4.0.

Наибольшую отдачу от инвестиций в данную систему можно ожидать в сложных, трудоемких производствах, где самый незначительный отказ может обернуться немалыми финансовыми потерями, а получаемый экономический эффект от внедрения зачастую превышает стоимость оборудования и его обслуживания. К примеру, в горнодобывающей промышленности основное внимание уделяется диагностированию трансмиссий дорогостоящей карьерной техники – большегрузных самосвалов, экскаваторов, бульдозеров, простои которых связаны с большими экономическими потерями добывающих предприятий (например, 1 час неработающего электрического экскаватора канатного типа обходится в десятки тысяч долларов) [3].

В последнее время производители интегрируют вибродиагностику в системы контроля, и вибросигналы теперь – часть машинных данных оборудования. Вибросистемы IFM, SKF, Montronix и др. поддерживаются в DPA (Developers Permit Agreements – программном обеспечении мониторинга в реальном масштабе времени) штатными функциями [4]. Несмотря на разные аппаратные характе-

ристики, любая система получает исходную информацию, необходимую для контроля и диагностики с оперативным поиском, локализацией, оценкой величины и прогнозированием развития дефектов по диагностическим моделям типовых кинематических узлов.

Индустрия 4.0 в горнодобывающей промышленности

Индустрия 4.0 уже широко распространена в отраслях, оборудование которых дорого как в приобретении, так и в обслуживании. Производители оснащают его большим количеством датчиков (у некоторых поставщиков их по умолчанию установлено более 100), однако при оценке состояния машин реально учитываются показания только порядка 5% из них. Еще меньше информации используется при прогнозе необходимости планово-предупредительных ремонтов, причем разработчики ссылаются на отсутствие надежной системы сбора и обработки данных.

Компания DMT постоянно отмечает важность эффективного внедрения решений Индустрии 4.0 в своих проектах для горнодобывающей отрасли по всему миру. Они касаются всех процессов – от оптимизации текущих расходов до построения тотальной системы управления качеством продукции и автоматической настройки производственных процессов в соответствии с результатами контроля. Основная задача, которую ставит для себя DMT, – интегрирование решения в струк-

туру послепродажного обслуживания, получение актуальной информации о состоянии машин, износе деталей и поломках и на этой основе своевременные контакты с потребителями карьерной техники.

Корпорация Komatsu разработала систему Komtrax, которая использует сеть спутников на земной орбите для передачи информации с самосвала на компьютер диспетчера. Компания Liebherr создала диагностическую систему Litronic Puls, которая включает мониторинг в реальном времени, обнаружение неисправностей и предупреждение о них, а также ряд методов обработки данных и получения трендов состояния узлов карьерного самосвала. Параметры и методы диагностирования не разглашаются. Зарубежные компании предлагают следующие системы диагностирования и мониторинга: Wenco – систему Eventing Systems, Modular Mining Systems (американская дочерняя компания Komatsu) – систему MineCare, Matrikon – систему Mobile Equipment Monitor и т.п. Однако стоимость названных зарубежных систем составляет, как правило, сотни тысяч долларов.

Сегодня в горнодобывающей промышленности активно внедряются информационно-управляющие комплексы «интеллектуальный карьер» [5]. Они существенно упрощают управление техническим обслуживанием, ремонтом и материально-техническим обеспечением, планирование оптимальных вариантов использования карьерной техники и ведение электронного эксплуатационного документооборота. В итоге все это обеспечивает накопление и системати-

зацию опыта по поиску и устранению неисправностей машин, а также принятия решений об их эксплуатации. Дальнейшее развитие системы «интеллектуальный карьер» предполагает наличие постоянно поступающих в информационно-управляющий комплекс данных о текущем техническом состоянии наиболее ответственных узлов машин работающей техники.

Их могут предоставлять установленные на машинах и работающие в автоматическом режиме диагностические комплексы, например созданная Объединенным институтом машиностроения (ОИМ) НАН Беларуси совместно с ОАО «БЕЛАЗ» бортовая система автоматизированной вибродиагностики зубчатых передач редукторов мотор-колес (РМК) карьерных самосвалов БЕЛАЗ (рис. 1) [6]. Назначение системы – предотвращение аварийного выхода из строя РМК в процессе эксплуатации самосвала.

Бортовая система диагностики

Базовыми в системе вибродиагностики редуктора мотор-колес выступают два основных компонента: аппаратурно-программная часть – с алгоритмами съема, обработки и анализа измерительной информации и последующей выдачей диагностических решений о техническом состоянии объекта, а также сам объект с показателями технического состояния (хорошее, допустимое, недопустимое). На этой основе строится соответствующая система распознавания неисправностей, свя-

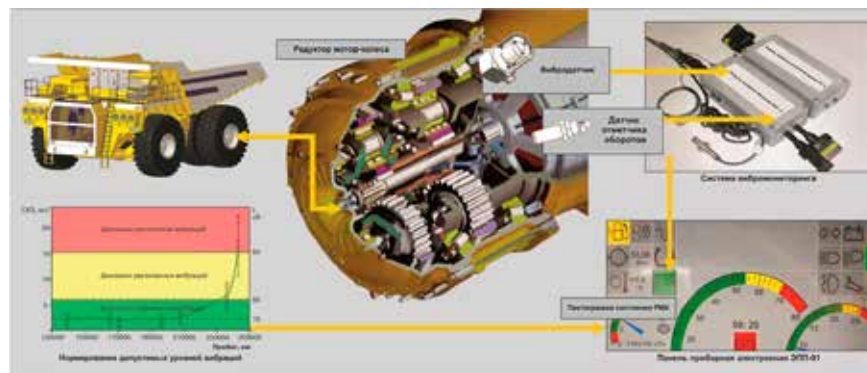


Рис. 1. Система бортовой вибродиагностики редукторов мотор-колес самосвалов БЕЛАЗ. Источник: [6]

зывающая измеренные вибрационные параметры с конкретными неисправностями РМК.

Принцип работы системы основан на том, что параметры ударных импульсов, возникающих при пересопряжении зубьев зубчатых колес, определяют величину внутренней динамической составляющей нагрузки в зацеплении, которая коррелирует с виброактивностью зубчатой передачи. В свою очередь, параметры ударных импульсов определяются геометрическими погрешностями зубчатых колес, инерционно-жесткостными характеристиками, нагрузочно-скоростными режимами их работы, эксплуатационными неисправностями – то есть, данные показатели отражают взаимосвязи между техническим состоянием, динамической нагруженностью и виброактивностью зубчатых механизмов, определяются степенью развития и локализации дефекта. Поэтому параметры вибрации (амплитуды гармонических составляющих, среднее квадратическое значение (СКЗ), пик-фактор, дискриминанты) могут служить достоверными диагностическими критериями оценки технического состояния зубчатых механизмов.

Прикладное программное обеспечение (ПО) бортовой системы вибромониторинга обеспечивает функционирование модулей микропроцессорной системы, управляет работой устройства ввода аналоговых и дискретных сигналов, процессом аналого-цифрового преобразования вибросигнала, реализует алгоритмы диагностирования, вычисление значений критериальных параметров, сравнение текущих значений с предельно допустимыми, постановку диагноза с информированием водителя о состоянии РМК, формирует исходные данные и результаты диагностирования в файлы для их хранения в памяти бортовой системы для более глубокого анализа в случае необходимости [7]. Особенность алгоритмов диагностирования РМК – постоянный учет рабочих режимов редуктора по крутящему моменту и скорости движения самосвала с их привязкой к текущим вибрационным параметрам механизма. ПО также создает пользовательский интерфейс ПЭВМ для предварительного программирования бортовой системы вибромониторинга перед установкой ее на борт самосвала (введение

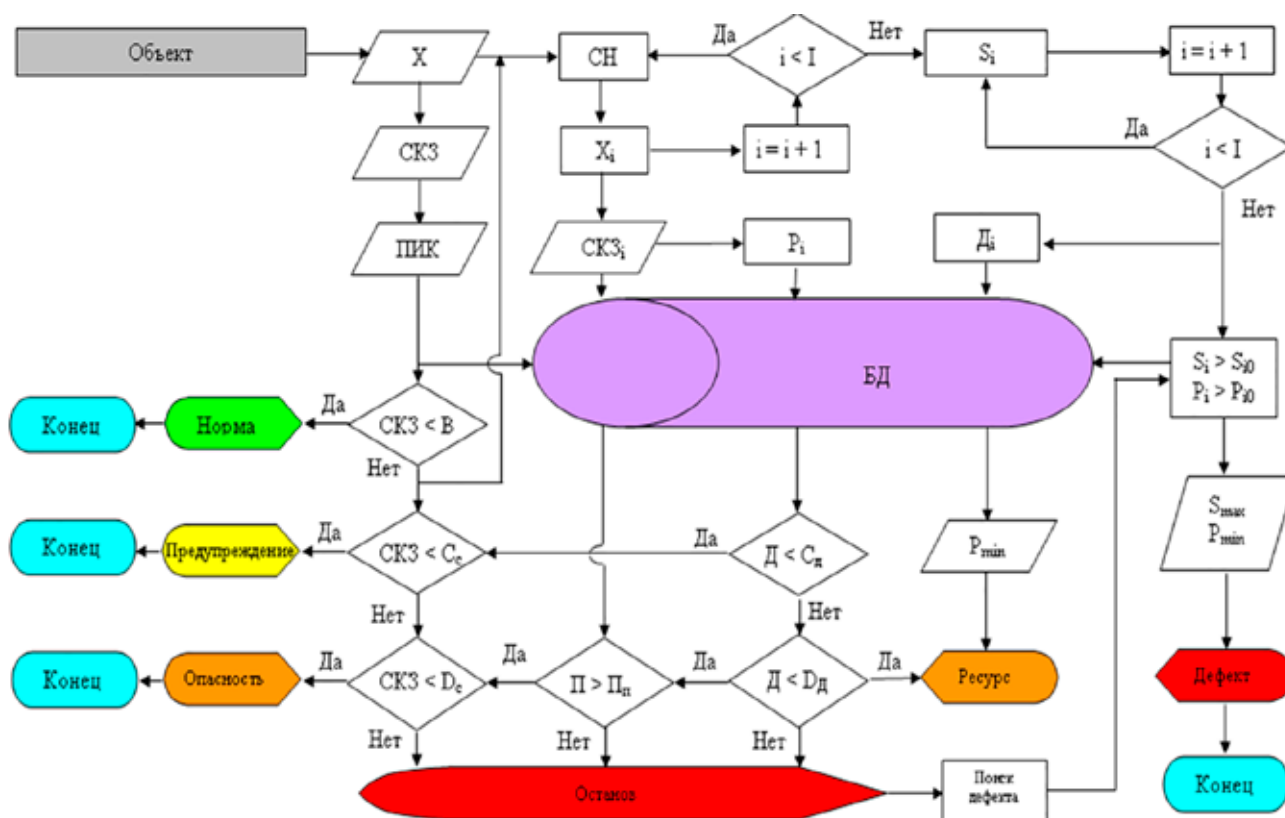


Рис. 2. Алгоритм диагностирования РМК. Источник: [7]

X – текущий вибросигнал; I – количество зубчатых пар; X_i – вибрация i -й зубчатой пары; S_i – спектр i -той зубчатой пары; S_{i0} – маска спектра i -й зубчатой пары; Π – ПИК-фактор; $СКЗ$ – среднее квадратическое значение; D – дискриминант; $СКЗ_i$, D_i – $СКЗ$ и дискриминант i -й зубчатой пары; P_i – текущий ресурс i -й зубчатой пары; P_{i0} – плановый ресурс i -й зубчатой пары; $\Pi_{п}$ – значение предыдущего замера ПИК-фактора; $В$ – граница зоны $В$ для $СКЗ$; $С_г$, $С_д$ – границы зоны $С$ для $СКЗ$ и дискриминанта; $Д_г$, $Д_д$ – границы зоны $Д$ для $СКЗ$ и дискриминанта; $БД$ – база данных; $СН$ – синхронное накопление

коэффициентов преобразования датчиков, создание файлов калибровочных коэффициентов, введение маски предельных значений и др.).

В общем виде алгоритм диагностирования РМК (рис. 2) следующий.

1. Записывается текущий вибросигнал – X ; вычисляются $СКЗ$ – среднее квадратическое значение и Π – ПИК-фактор.

2. $СКЗ$ сравнивается с граничным значением области нормальной эксплуатации $В$. Если $СКЗ < В$, то на мониторе у водителя высвечивается сообщение о нормальной эксплуатации, и программа заканчивает работу до следующего замера.

3. Если $СКЗ > В$, то $СКЗ$ сравнивается с граничным значением области ограниченной эксплуатации $С$, и программа начинает обработку сигнала по алгоритму синхронного накопления. Определяются вибросигналы каждого из валов редуктора X_i , их спектры S_i , значения $СКЗ$ вибрации и дискриминанты D .

4. Если $СКЗ$ редуктора и дискриминанты валов ниже своих границ области $С$, то на мониторе у водителя высвечивается предупреждение, и программа заканчивает свою работу до следующего замера; если этот показатель выше, то $СКЗ$ сравнивается с граничным значением опасной области $Д$, и про-

грамма продолжает обработку сигнала. Определяются $СКЗ$ вибрации отдельных валов, рассчитывается ресурс находящихся на них зубчатых колес.

5. При общем $СКЗ$ редуктора и дискриминанты валов ниже соответствующих границ области $Д$ и увеличении ПИК-фактора появится предупреждение об ограниченной эксплуатации и предполагаемый ресурс элемента редуктора, имеющий наименьшее значение, и программа заканчивает свою работу до следующего замера.

6. Если общий $СКЗ$ редуктора и дискриминанты валов выше границы области $Д$, а ПИК-фактор начинает уменьшаться,

то рекомендуется остановиться на ремонт, программа продолжает обработку сигнала.

7. Спектры отдельных валов Si сравниваются с Si0 – соответствующими масками, рассчитываемый ресурс зубчатых колес сравнивается с базовым, и выносятся заключение о наиболее вероятных неисправностях редуктора.

В процессе эксплуатации система периодически опрашивает датчики, установленные на бортовых редукторах, автоматически обрабатывает диагностическую информацию, оценивает техническое состояние каждой зубчатой передачи редуктора и своевременно информирует об этом оператора (водителя) индикацией соответствующего светового сигнала:

- *вибрационные параметры находятся в пределах допустимых значений (эксплуатация без ограничений) – зеленый цвет;*
- *вибрационные параметры редуктора периодически выходят за пределы допустимых значений – желтый цвет. При этом эксплуатация машины продолжается, ремонтная служба посредством ПО верхнего уровня диагностики проводит углубленный анализ вибраций РМК с определением дефектного элемента и прогнозом его остаточного ресурса. При плановом техническом обслуживании проводится вскрытие редуктора, оценивается возможность устранения причин повышенной вибрации (регулировка, затяжка соединений, долив масла и др.) и принимается решение о проведении ремонта или дальнейшей эксплуатации самосвала;*

- *вибрационные параметры РМК превышают допустимые значения – красный цвет. При этом немедленно прекращается работа самосвала во избежание аварийного выхода РМК из строя, машина должна направляться в ремонт.*

Программное обеспечение верхнего уровня «Вибро-2» устанавливается на ПЭВМ диспетчерской службы карьера и предназначено для анализа и углубленной диагностики РМК по файлам данных, накопленных бортовой системой вибромониторинга за определенный период эксплуатации самосвала. В алгоритмах диагностирования используются современные методики анализа вибрационных процессов мобильных машин. Применение модуля синхронного усреднения диагностической информации позволяет автоматически фильтровать данные о вибрации за один оборот вала, получая информацию о каждом зубчатом колесе в отдельности. Взаимодействие с оператором осуществляется в диа-

логовом режиме работы на русском языке посредством оконного интерфейса.

Созданная система вибромониторинга РМК была аттестована в БелГИМ, прошла двухлетнюю апробацию на самосвалах БЕЛАЗ в карьере Полтавского горно-обогатительного комбината, по результатам которой были устранены основные обнаруженные неполадки в аппаратной части и программном обеспечении.

Беспроводная передача данных как одно из условий внедрения Индустрии 4.0

Вместе с тем опыт карьерной эксплуатации системы вибромониторинга показал, что для ее широкого внедрения необходимо минимизировать участие человека в процессах съема и передачи заинтересованным структурам диагностической информации о состоянии РМК карьерных самосвалов. С этой целью в 2020–2021 гг. была проведена доработка

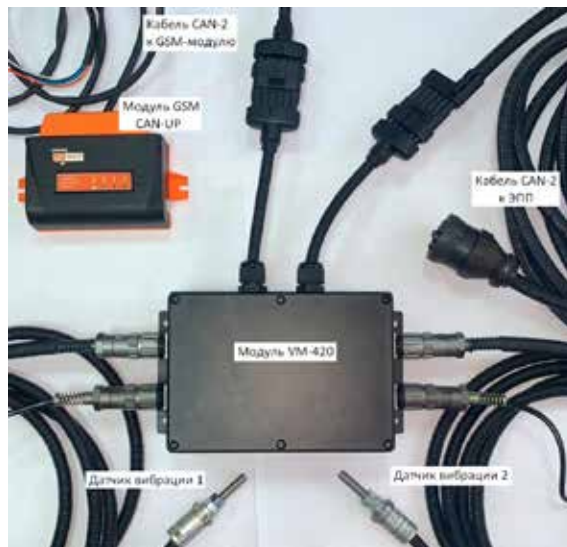


Рис. 3. Система вибромониторинга СВМ-РМК-420 с беспроводной передачей данных
Источник: [8]

и апробация бортовой системы в части обеспечения автоматизированной беспроводной передачи диагностических данных посредством сетей GSM.

Созданная система вибромониторинга СВМ-РМК-420 (рис. 3) [8] позволяет решать следующие основные задачи

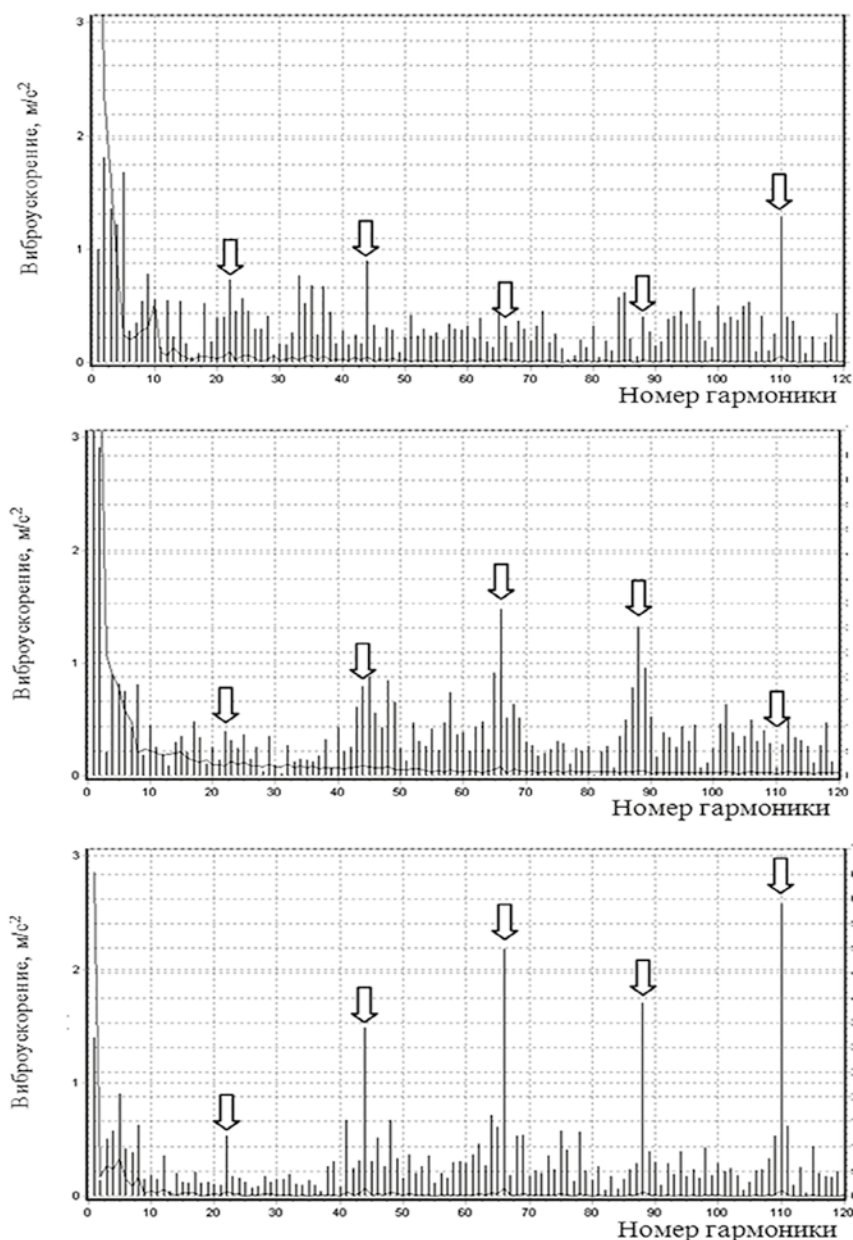
по обеспечению контроля и диагностики технического состояния редукторов мотор-колес самосвала БЕЛАЗ:

- регистрация и хранение в энергонезависимой памяти параметров вибрации обоих РМК самосвала, необходимых для оценки их технического

состояния в течение заданного интервала времени;

- ведение на борту машины оперативного контроля общего технического состояния РМК по граничным значениям параметров вибрации в процессе технологического цикла в карьере, индикация критических состояний РМК и визуализация на панели приборов основных критериевых значений вибрации;
- формирование пакетов данных вибромониторинга РМК за заданный промежуток времени и передача их по CAN-интерфейсу в модуль GSM по соответствующему протоколу, а также в Интернет;
- организация приема данных и передача служебной информации на сервер (компьютер со специальным программным обеспечением);
- сбор, сортировка и обработка данных вибросостояния РМК, собранных в течение заданного цикла (например, за межсервисный интервал работы) от различных машин;
- формирование на сервере баз данных вибромониторинга РМК по ряду машин, ранжирование этих данных по заданным критериям, построение трендов вибросостояния;
- использование программной платформы для проведения углубленной диагностики с целью выявления дефектов на уровне узлов и элементов РМК самосвалов БЕЛАЗ.

Особенностями беспроводной системы вибромониторинга СВМ-РМК-420 являются: надежная передача данных в условиях прерывания и нестабильности сотовой связи; передача значительных



Пробег самосвала: а – 164 044 км; б – 194 809 км; в – 233 357 км

Рис. 4. Гармонические спектры вибрации вала солнечной шестерни второго планетарного ряда РМК в зависимости от пробега. Источник: [8]

объемов информации для обеспечения высокоинформативного амплитудно-частотного анализа вибрации критичных элементов редуктора посредством пакетной передачи данных в бинарном коде; использование обратной связи для дистанционного управления с сервера установками режима работы системы вибромониторинга. Все это позволяет разделить информацию о техническом состоянии РМК на два уровня: начальный – ведение на борту самосвала оперативного контроля общего технического состояния редуктора с визуализацией на панели приборов машины предупреждающих сигналов оператору (водителю); углубленный уровень диагностирования – выявление дефектов целых узлов и элементов РМК самосвалов БЕЛАЗ на компьютерах эксплуатирующих и обслуживающих организаций.

Мониторинг технического состояния на пути к «умному карьеру»

Благодаря возможности беспроводной передачи на компьютер сервисных служб не только средних численных значений вибраций, но и записи их сигналов персонал ремонтных подразделений карьера может с помощью программного обеспечения верхнего уровня анализировать амплитудно-частотные и гармонические спектры вибрации РМК. На рис. 4 в качестве примера приведены гармонические спектры вибраций солнечной шестерни второго планетарного ряда РМК, полу-

ченные при различных значениях пробега самосвала.

На спектрах наблюдается ряд гармоник, характерных для установленной на нем солнечной шестерни с числом зубьев $z=22$ (гармоники №№22, 44, 66, 88 и 110-зубцовый f_z и кратных ей частот $2 f_z$, $3 f_z$, $4 f_z$ и $5 f_z$). Рост амплитуд названных гармоник с увеличением пробега самосвала позволяет использовать их в качестве критерия при эксплуатационной оценке текущего технического состояния солнечной шестерни второго ряда РМК.

Внедрение бортовых беспроводных систем вибромониторинга дает значительные преимущества всем организациям и структурам, связанным с производством и эксплуатацией карьерной техники.

Наиболее заинтересованной стороной являются службы, связанные с обслуживанием и ремонтом. Они получают возможность контролировать ресурс тех-

ники, проводить оценку экономической целесообразности дальнейшей эксплуатации, планировать проведение ремонтно-восстановительных работ, организовывать распределение запасных частей, необходимых для формирования одиночного, группового и ремонтного комплектов, снижать численность персонала в сфере технического обслуживания и ремонта.

С точки зрения добывающих организаций, внедрение беспроводных систем вибромониторинга обеспечит:

- *уменьшение расходов на техническое обслуживание за счет предотвращения незапланированного простоя;*
- *повышенную безопасность персонала и техники;*
- *более низкие производственные затраты за счет оптимальной настройки технологического процесса;*
- *управление рациональным использованием топлива и энергоресурсов;*



Рис. 5. Преимущества беспроводной системы вибромониторинга для производителя карьерных самосвалов. Источник: [8]

- оптимальную производительность машин по загрузке за счет контроля и учета рабочего времени и простоев и т.д.

Преимущества наличия удаленной беспроводной системы контроля и обработки данных вибромониторинга для производителя карьерных самосвалов приведены на рис. 5.

Заключение

Отечественные нормативные документы не предусматривают систематического применения информационных технологий для поддержки процессов логистического анализа, таких как безопасность, надежность, контролепригодность, эксплуатационная и ремонтная технологичность, техническое обслуживание и ремонт, материально-техническое обеспечение и др., в рамках интегрированной информационной среды предприятия. Однако проблема внедрения мониторинга технического состояния машин и организации их техобслуживания по фактическому состоянию приобрела особую актуальность в связи с большей ориентацией отечественных машиностроительных предприятий на международные рынки и потребностью снизить затраты на эксплуатацию мобильных ТСИ. Это предопределяется необходимостью перевода данных процессов на современную методическую и программно-техническую базу, приемлемую в первую очередь для иностранных заказчиков отечественной продукции. Таким образом, вопрос внедрения Индустрии 4.0 в целом и Мониторинга состояния 4.0 в частности для изделий отечественных

предприятий переходит в ряд первоочередных, поскольку от ее решения в значительной мере зависит конкурентоспособность отечественной продукции на мировых рынках. Кроме того, мониторинг технического состояния уже встал на путь Индустрии 4.0, и сейчас эффективно работающая автоматическая система оценки и управления техническим обслуживанием оборудования с полной интеграцией в системы управления активами – необходимость в рамках концепции промышленного Интернета вещей.

Использование системы вибромониторинга редукторов мотор-колес самосвалов БЕЛАЗ с беспроводной передачей данных позволяет эксплуатационным службам карьера организовать централизованное управление режимами сбора данных; непрерывно собирать их с вибродатчиков различного типа с заданной частотой изменений; оперативно обрабатывать и отображать в реальном времени; оценивать остаточ-

ный ресурс критичных элементов редуктора. Это дает возможность оптимизировать расходы на ремонт и техническое обслуживание самосвалов при обеспечении их максимальной эксплуатационной готовности. При этом служба механика может осуществлять контроль технических параметров самосвала, выдавать оперативную информацию для ремонтных служб, составлять диаграмму неисправностей машин, производить идентификацию неработающих узлов.

Наличие и оснащение такими средствами мобильных машин является ключевым условием для перехода от высокзатратных планово-предупредительных ремонтов к их обслуживанию по фактическому состоянию, что значительно снижает эксплуатационные затраты потребителя на поддержание самосвалов в рабочем состоянии, а значит, повышает привлекательность и конкурентоспособность выпускаемой техники. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Why You Need A Data Strategy To Succeed In Industry 4.0 // <https://www.forbes.com/sites/teradata/2015/04/08/why-you-need-a-data-strategy-to-succeed-in-industry-4-0/#60dbec8a4536>.
2. Integrating the Next Generation of Vibration Analysis into Condition Monitoring Strategies // <https://www.oneprod.com/unclassified/integrating-the-next-generation-of-vibration-analysis-into-condition-monitoring-strategies/>.
3. Дэн Ноуэр. Предотвратить аварийный останов // Горная промышленность. 2013. №4. С. 41–44.
4. МОНИТОРИНГ 2017. Итоги / Система мониторинга в реальном времени платформы DPA (Discrete Processes Automation) // https://rundpa.com/legacy/monitoring_2017_itogi.
5. Беспилотная техника и интеллектуальные разработки. Лукашенко ознакомился с инновациями при добыче щебня на «Граните» // <https://www.belta.by/president/view/bespilotnaja-tehnika-i-intellektualnye-razrabotki-lukashenko-oznakomilsja-s-innovatsijami-pri-dobyche-444475-2021/>.
6. Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств / В.Б. Альгин [и др.]; под общ. ред. В.Б. Альгина, В.Е. Старжинского. – Минск, 2017.
7. Ишин Н.Н. Динамика и вибромониторинг зубчатых передач / Н.Н. Ишин. – Минск, 2013.
8. Ишин Н.Н. Использование беспроводных технологий передачи диагностических данных для оценки технического состояния РМК самосвала БЕЛАЗ / Н.Н. Ишин, А.С. Скороходов, В.И. Адашкевич, Д.Н. Ахременко, А.В. Черепок, С.А. Шишко // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – Минск, 2021. Вып.10. С. 181–187.