

УДК 621.833

Н.Н. ИШИН, канд. техн. наук; В.Б. АЛЬГИН, д-р техн. наук  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ УЗЛОВ МАШИН

*Рассмотрено общее состояние вибродиагностики технических объектов, особенности продукции фирм-производителей аппаратных и программных средств, подходы и методы диагностирования трансмиссионных систем мобильных машин. Подробно проанализированы и классифицированы системы диагностирования зубчатых передач мобильных машин в эксплуатации. Выделены особенности функционирования зубчатых передач, из-за которых использование для их диагностики стандартных виброакустических средств ограничено. Описана бортовая автоматизированная система вибродиагностики редукторов мотор-колес большегрузных самосвалов БелАЗ. Сформулированы перспективные направления развития вибродиагностики применительно к трансмиссионным узлам мобильных машин.*

**Ключевые слова:** *мобильная машина, вибродиагностика, трансмиссия, зубчатая передача, аппаратно-программные средства, классификация систем, направления развития, мотор-колесо, техническое состояние*

**Введение.** В статье анализируется современное состояние и тенденции развития вибродиагностики технических объектов с акцентом на трансмиссии и узлы, содержащие зубчатые передачи мобильных машин. Используются публикации, в том числе и зарубежные, а также результаты исследований, проведенных в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси (ОИМ) в рамках ГПНИ «Механика, техническая диагностика и металлургия».

Существенная трудность подобного анализа состоит в сравнительно небольшом числе публикаций, касающихся вибродиагностики трансмиссий мобильных машин и особенно зубчатых передач, несистемности таких исследований, их незавершенности, применении различных методик, что осложняет сопоставление результатов. Число зарубежных публикаций в целом невелико, поскольку результаты исследований в рассматриваемой области являются ноу-хау производителей, а представляемые сведения носят в основном общий или рекламный характер. Вместе с тем, обобщение имеющейся информации, классификация подходов позволяет наметить перспективные направления работ по развитию методов вибродиагностики применительно к трансмиссионным узлам мобильных машин.

**Современное состояние вибродиагностики.** Развитие сенсорной базы и вычислительной техники позволяет создавать все более совершенные вибродиагностические комплексы, обеспечивающие эффективный контроль текущего технического состояния сложных систем и достаточно обоснованное прогнозирование эксплуатационного ресурса их наиболее ответственных элементов. Сегодня на рынке Беларуси помимо традиционно известных производителей вибро- и шумоизмерительной техники (Schenck, Larson & Davis, Brüel & Kjær, SKF, National Instruments и др. [1–5]), активно предлагают свою продукцию производители России и Укра-

ины, специализирующиеся на разработке и продаже оборудования и приборов для балансировки, виброакустического контроля и диагностики.

При этом ведущие западноевропейские и американские фирмы-производители аппаратных и программных средств для виброакустической диагностики идут по пути создания *модульных систем* («кирпичиков»), из которых формируются измерительные каналы и на которые возлагаются задачи съема и хранения информации. *Обработка и анализ* измерительной информации ведется на ПЭВМ с помощью специализированных или универсальных программных пакетов. Такие системы имеют более широкие возможности обработки и анализа виброакустических сигналов по сравнению с традиционными стационарными и переносными виброанализаторами и шумомерами с набором стандартных функций.

В СНГ лидирующее положение в области создания методов и средств вибродиагностики, занимают фирмы Диамех, Васт, Инкотес и др. [6–13]. Ими выпускаются широко используемые в производственных и исследовательских целях виброанализаторы: «Кварц», «Топаз», «АУ-014» (ООО «Диамех», г. Москва), «СК-2300» (ИТЦ «Оргтехдиагноз», г. Москва), «СД-12» (АО «ВАСТ», г. Санкт-Петербург), «СМ-3001» и «ДСА-2001» (ООО «Инкотес», г. Нижний Новгород), «Корсар+» (ООО «Вибро-Центр», г. Пермь), «ВИК» (НТЦ «ВиКонт»). Перечисленные приборы являются *автономными микропроцессорными переносными устройствами*, позволяющими измерять, обрабатывать, хранить и визуализировать измеренную виброакустическую информацию.

Большинство средств вибродиагностики, как западного, так и производства СНГ, имеют достаточно узкую специализацию (балансировка роторов и диагностика подшипниковых узлов различного технологического оборудования) и ориентированы на про-

изводственную диагностику. В исследовательских целях их применение затруднено наличием жестких алгоритмов, реализуемых аппаратными средствами в специализированном вычислителе, исключающих возможность изменения программной конфигурации вычислительных средств, для решения новых задач анализа и управления экспериментом.

*Основные тенденции развития НИР и ОКР* в области создания программно-инструментальных средств вибродиагностики:

- агрегатирование и миниатюризация вибродиагностической аппаратуры; модульное построение комплексов, составленных из широкого ассортимента электронных серийных, а также уникальных приборов, соответствующих требованиям конкретных задач;
- построение средств обработки информации на базе микропроцессоров или портативных ПЭВМ как компонентов системы, обеспечивающих высокую эффективность ее работы наряду с широкими возможностями программного изменения алгоритмов обработки данных, обучения системы;
- создание программного обеспечения, а в необходимых случаях и специальных модулей диагностики конкретных механизмов и технических систем, обеспечивающих по данным анализа их вибрационных спектров идентификацию динамических параметров;
- разработка «виртуальных приборов» и рабочих методик их применения для анализа качества функционирования и состояния работоспособности конкретных типов механизмов, прогнозирования их остаточного ресурса.

Методические и инструментальные средства вибродиагностики и прогнозирования остаточного ресурса по изменению вибрационных параметров наиболее активно развиваются применительно к подшипникам качения, поскольку в двух случаях из трех аварийная остановка оборудования происходит по причине выхода из строя подшипников. (*Остаточный ресурс — наработка изделия от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние*).

Однако в публикуемых описаниях практически отсутствуют конкретные методики и примеры практического использования средств вибродиагностики применительно к зубчатым передачам и приводным механизмам наземных мобильных машин.

**Вибродиагностика приводных систем.** Анализ публикаций [14–25], посвященных эксплуатационной оценке технического состояния приводных механизмов на основе зубчатых передач, а также методов и средств прогнозирования остаточного ресурса трансмиссионных систем, показывает, что из существующих методов (прогнозирование ресурса по величине массы частиц износа в масле, потере КПД, изменению рабочей температуры наиболее нагруженных узлов, люфтометрии и др.) наиболее перспективными являются *методы безразборного контроля динамических характеристик* приводных

механизмов путем постоянного или периодического мониторинга их вибрационных параметров.

В работе [14] рассмотрены возможности использования виброакустического анализатора А17 для *контроля работоспособности зубчатых зацеплений*. На примере доводки экспериментальных зубчатых передач рассматриваются возможности применения виброакустических методов для диагностики повреждений зубчатых колес в условиях стендовых усталостных испытаний. Контроль и отбраковку зубчатых передач предлагается проводить по уровням *спектральных компонентов* оборотных и зубцовых частот.

Корпорация UTC Aerospace Systems (США) рекламирует разработанную бортовую систему вибродиагностики трансмиссии вертолетов HUMS (Health & Usage Monitoring Systems) [26, 27]. Конфигурация системы HUMS на вертолете Bell 412 показана на рисунке 1. Контроль за уровнем вибраций позволяет получить информацию о состоянии основных узлов и агрегатов и возможность раннего обнаружения дефекта, необходимого инженерно-техническому составу для принятия решения о замене детали. Ключевым элементом HUMS является программное обеспечение, которое анализирует *информацию, поступающую от акселерометров, установленных на двигателях и трансмиссии*, и накапливающуюся бортовыми регистраторами. У вертолета порядка двух десятков датчиков, которые выдают большой объем данных. Система опрашивает датчики несколько раз за время полета через определенные промежутки времени и сохраняет их в памяти регистратора. Обработка и анализ этих данных ведется на земле, но информация о функционировании узлов вертолета выводится и на дисплей пилота. Система была апробирована на партии из 20 вертолетов, которые

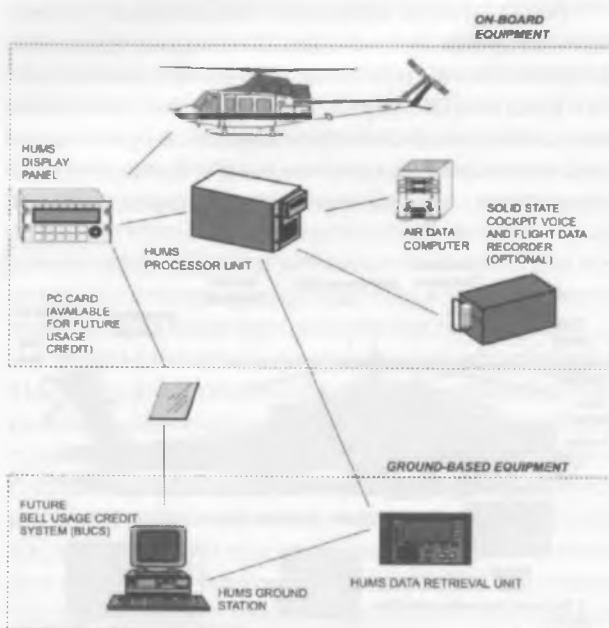


Рисунок 1 — Конфигурация системы HUMS на вертолете Bell 412 [27]

приняли участие в боевых действиях в ходе иракской войны. За 12 месяцев подразделение, в котором эксплуатировались вертолеты, установило рекорд по налету, использование системы позволило сэкономить до 45 млн долл. на затратах, связанных с техническим обслуживанием (материально-технические средства и трудозатраты) и летной эксплуатацией. К 2015 году армия США планирует оснастить системой контроля технического состояния весь парк своих вертолетов. На зарубежном рынке оснащение системой HUMS вертолетов повышает их конкурентоспособность. Неполный перечень вертолетов, оснащенных системами HUMS производства США, ЮАР, Израиля и др., насчитывает уже около трех десятков моделей.

Аналогичная разработка компании Farnell (Россия) — бортовая система контроля диагностическая, позволяющая производить контроль и диагностику редукторов вертолетов по вибрационным параметрам [28]. Система обеспечивает одновременное получение и обработку данных от вибродатчиков в реальном времени, проведение математической обработки сигналов и сохранение в памяти результатов контроля. Российская компания Авиашельф оборудовала несколько своих вертолетов МИ-8 системой контроля и диагностики компании Farnell.

Российский вертолетостроительный холдинг «Вертолеты России», входящий в Объединенную промышленную корпорацию «Оборонпром», один из лидеров среди мировых разработчиков и производителей вертолетов, представил на форуме «Технологии в машиностроении - 2012» проект перспективной системы мониторинга работоспособности и учета наработки агрегатов и систем вертолета А-HUMS [29].

Есть и другие аналогичные разработки для вертолетов, например Vibration Management Enhancement Program (VMEP) (рисунок 2).

Большинство известных публикаций, посвященных системам и методам диагностики трансмиссионных систем наземных мобильных машин, носят рекламный характер. При этом основное внимание уделяется диагностированию трансмиссий дорогостоящей карьерной техники — большегрузных самосвалов, экскаваторов, бульдозеров, простои

которых связаны с большими экономическими потерями добывающих предприятий.

Так в работах [16, 23] освещены вопросы применения лабораторных методов физико-химического и спектрального анализа масел. В процессе эксплуатации периодически, при проведении технического обслуживания проводится комплексный спектрографический анализ работавших масел, с целью определения в них количества продуктов износа и загрязнения. По результатам анализов выявляются нарушения в работе узлов и агрегатов ДВС, редукторов мотор-колес и определяется пригодность масла для дальнейшего применения. На основе этих данных выдаются рекомендации ремонтным службам по устранению неисправностей, что позволяет сократить число случаев аварийных отказов.

Фирма Caterpillar [31] сообщает о диагностическом сканере (Cat ET) электронных систем, управляющих двигателями и электромеханическими агрегатами самосвала. Диагностирование проводится по величине потребляемого системами управления тока, работает в реальном времени и позволяет своевременно обнаруживать и устранять возникающие неполадки и неисправности.

Фирма Komatsu с целью снижения непроизводственных расходов и повышения эффективности использования транспортных средств разработала систему Komtrax, которая использует сеть спутников на земной орбите для передачи информации с самосвала на компьютер диспетчера [32]. Система позволяет контролировать место нахождения и движение машин на рабочей территории, определять эффективность работы водителей, проследить топливное потребление, время работы машины на различных режимах и т. д. Оценка работоспособности наиболее ответственных узлов машины ведется системой контроля технического состояния транспортного средства (VHMS), которая может интегрироваться в систему Komtrax. Система VHMS в реальном времени передает на компьютер диспетчера данные об эксплуатационных режимах работы механизмов и возникающих в них неполадках. Это позволяет оперативно связаться с сервисной службой и принять решение о проведении ТО или ремонта неисправного агрегата автомобиля, предотвратив аварийный выход его из строя.

Компания Liebherr разработала диагностическую систему Litronic Puls [33], 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.

Системы диагностирования и мониторинга предлагают компании: Wenco — система Eventing Systems, Modular Mining Systems (американская дочерняя компания Komatsu) — система MineCare,



Рисунок 2 — Конфигурация системы VMEP для вертолета AH-64A [30]

Matrikon — система Mobile Equipment Monitor (рисунки 3 и 4) [34, 35] и т. п.

Названные зарубежные разработки являются либо поисково-исследовательскими, либо полностью закрытыми, так как имеют элементы ноу-хау.

**Отечественные системы контроля и диагностики.** На Минском автозаводе активно разрабатывают перспективные электронные системы. Так, новая бортовая система контроля и диагностики осуществляет контроль и выдает данные по нагрузке на ось, расходу топлива, средней скорости движения грузовика, а цифровой 28-суточный тахограф позволяет за лю-

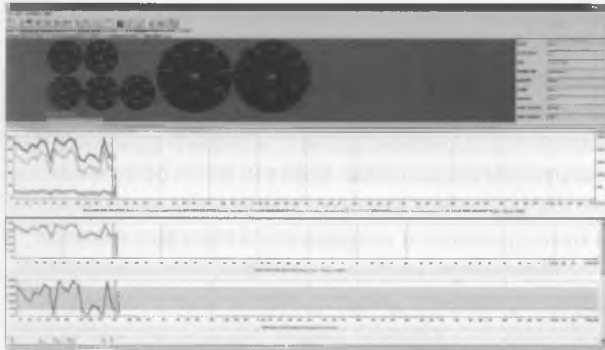


Рисунок 3 — Работа системы MineCare в реальном времени [34]

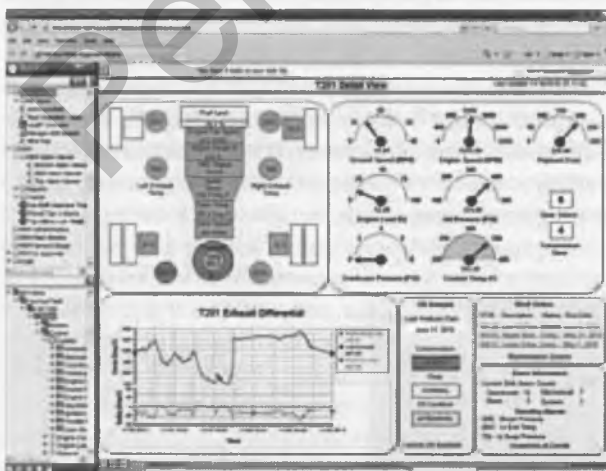
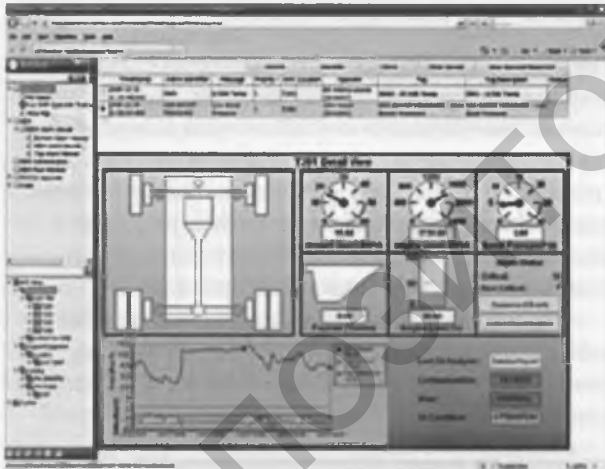


Рисунок 4 — Рабочие окна системы Mobile Equipment Monitor [35]

бой период времени автоматизировать учет и контроль работы водителя транспортного средства [36].

Белорусский автомобильный завод совместно с российской фирмой «Вист-групп» оснащает большегрузные самосвалы БелАЗ системой контроля загрузки (СКЗ), функционирующей на базе бортового компьютера [25]. СКЗ фиксирует в памяти компьютера скорость движения, вес перевозимого груза, давление в шинах, расход топлива и другие эксплуатационные параметры машины.

Для полноты картины следует упомянуть об отечественных публикациях последних лет, относящихся к вопросам диагностики трансмиссий мобильных машин.

В работе [37] описан подход к диагностированию поломок в коробках передач автомобилей. В качестве характерной ситуации авторы работы рассматривают поломку зуба зубчатого колеса. Выявление поломки предлагается проводить на основе анализа неравномерности вращения одного из валов трансмиссии. Неясно, для чего в статью [37] помещена математическая модель трансмиссии как системы с переменной структурой, содержащей сцепление. Авторы приводят систему уравнений, включающую переменные  $L_0$  и  $L_1$ , которые они называют «дискретными функциями состояния». Однако упомянутая система уравнений не может быть решена, поскольку математически не описаны условия изменения  $L_0$  и  $L_1$  в процессе ее решения (не показано, как перейти от состояния замыкания к размыканию сцепления и наоборот). Непонятно, зачем авторам моделировать режимы включения и выключения сцепления, если они в процессе диагностики воспроизводят установившийся процесс вращения трансмиссии на стенде. Этот процесс сопровождается импульсным воздействием, возникающим при входе и выходе из зацепления фрагмента зубчатого колеса с поломанным зубом. Рассматриваемая проблема и подход к ее решению вызывают сомнения. Основное назначение диагностики — отслеживание технического состояния с целью предотвращения поломок, а рассматриваемый подход нацелен на выявление фактов произошедших поломок. Даже если предположить, что такой подход имеет определенный смысл, снятие трансмиссии и установка ее на стенд для выявления поломок представляются весьма трудоемкими операциями при реализации на практике.

В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси разработан способ косвенного определения величины окружного люфта трансмиссий троллейбусов по максимальной величине джерка (первой производной по времени продольного ускорения) кузова троллейбуса за весь процесс разгона, позволяющий контролировать общее техническое состояние трансмиссии машины, сравнивая текущее значение люфта с предельно допустимым [38]. Особенностью является использование не установившегося процесса, превалирующего в рас-

смотренных ранее подходах, а переходного процесса и его показателя (джерка). Кроме того, предлагается адаптивная система, которая по результатам определения джерка корректирует задаваемую характеристику тягового электродвигателя в эксплуатации, тем самым обеспечивая снижение динамических нагрузок трансмиссии троллейбуса. Способ прост в реализации, ориентирован на периодический (во время технического обслуживания) контроль интегральных параметров износа трансмиссии. Вместе с тем он имеет определенные ограничения, поскольку не позволяет выявлять конкретные дефектные детали, и ориентирован на периодически проводимые процедуры обслуживания.

Обобщая сказанное, можно сделать вывод о том, что большинство устанавливаемых как на зарубежные, так и на отечественные машины систем, пока еще является *системами диспетчеризации*. Они обеспечивают решение задач контроля и учета работы машин на трассе или в карьере, то есть слежения в режиме реального времени за их загрузкой, расходом топлива, скоростью, местоположением, учета простоев и нарушений технологических режимов эксплуатации. *Эффективные системы диагностики технического состояния зубчатых передач трансмиссионных узлов мобильных машин в рассмотренных публикациях не представлены.*

В части характерных особенностей методико-инструментальных средств вибродиагностики трансмиссионных узлов машин можно отметить следующее:

- мировые лидеры по производству большегрузной автотракторной и карьерной техники (Caterpillar, Komatsu и др.) активно работают в направлении создания и оснащения выпускаемой ими продукции системами оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса наиболее ответственных узлов машин с целью предотвращения аварийных выходов из строя, снижения затрат на техническое обслуживание в эксплуатации (путем перехода от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию), повышения ее конкурентоспособности;
- отсутствуют конкретные методики и наработки по оценке технического состояния непосредственно зубчатых передач и прогнозированию остаточного ресурса по изменению их виброакустических характеристик в процессе испытаний или эксплуатации.

**Особенности функционирования зубчатых передач.** Функционирование зубчатых передач мобильной техники имеет свои, отличительные от привод-

ных механизмов других машин и оборудования особенности, которые необходимо учитывать при разработке и создании методико-инструментальных средств их вибродиагностики.

*Во-первых, это высокая нагруженность, низкие рабочие скорости и сравнительно низкая степень точности изготовления (7...9 степень).* Эти особенности создают условия для развития выраженных локальных дефектов и неисправностей, порождающих импульсные процессы (ударные импульсы) во взаимодействиях кинематических пар узлов и деталей. В процессе эксплуатации зубчатых механизмов, дефекты и неисправности создают серии импульсов, которые имеют низкоамплитудный, широкополосный спектр и поэтому в практической вибродиагностике зачастую принимаются за шум. Известно, что подобные дефекты развиваются лавинообразно и могут приводить к аварийным выходам машин из строя, поэтому их диагностика требует получения информации о неисправности на ранних этапах ее развития.

*Параметры ударных импульсов, возникающих при пересопределении 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. Таким образом, параметры ударных импульсов отражают взаимосвязи между техническим состоянием, динамической нагруженностью и виброактивностью зубчатых механизмов, определяются степенью развития и локализации дефекта, поэтому могут служить его достоверными диагностическими признаками.

На рисунке 5 приведена логическая схема взаимосвязи параметров ударного импульса в зацеплении и вибрационного сигнала на корпусе подшипникового узла редуктора.

Контроль в реальном времени вибрационного сигнала на корпусе редуктора, совмещенный с контролем нагруженности зуба методами тензометрирования, позволяет в принципе оценить силу ударного взаимодействия в каждой паре зацепляющихся зубьев, с последующей оценкой действительных контактных напряжений в зацеплении и выходом на оценку фактического остаточного ресурса передачи.

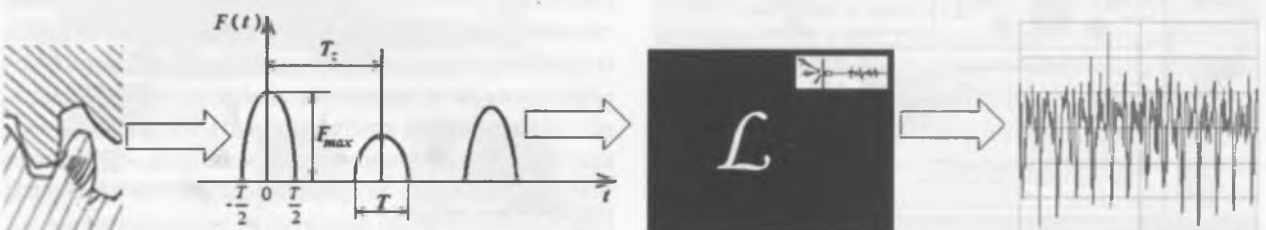


Рисунок 5 — Схема взаимосвязи параметров ударного импульса в зацеплении и вибрационного сигнала на корпусе подшипника



Еще одной особенностью зубчатых передач трансмиссионных систем мобильных машин является их работа в условиях *постоянно меняющихся скоростей и нагрузок*. Вибрационные характеристики узлов трансмиссии, помимо внутренних факторов, в значительной степени определяются внешними динамическими факторами, обусловленными рельефом и покрытием дороги, степенью загрузки автомобиля, квалификацией водителя и др. В таких условиях характер вибраций (амплитудный и частотный состав) непрерывно меняется, и использование серийно выпускаемой аппаратуры для вибромониторинга технического состояния элементов трансмиссии путем спектрального анализа в процессе эксплуатации машин оказывается весьма затруднительным [39–41]. Упомянутая фирма Диамех напрямую связывает достоверность результатов диагностики подшипников качения при использовании ее аппаратуры с необходимостью отсутствия в работе механизма ударных импульсов.

Указанные особенности функционирования зубчатых передач мобильных машин приводят к тому, что использование для их диагностики стандартных виброакустических средств контроля в значительной степени ограничено. Это связано с тем, что подавляющее большинство разработанных диагностических методов и стандартных инструментальных средств ориентированы на диагностику подшипниковых узлов. Они наиболее эффективны при диагностировании роторных узлов машин, работающих в *квазистационарных условиях*, т. е. в условиях, когда рабочие скорости и нагрузки меняются незначительно, а динамика механизма обусловлена, в основном, геометрическими погрешностями изготовления и монтажа деталей и их изменениями в процессе эксплуатации. К таким объектам относятся различные электродвигатели, генераторы, вентиляторы, турбины, компрессоры, насосы и др. Их вибрационные характеристики при нормальном функционировании имеют достаточно стабильный характер, что позволяет эффективно использовать общеизвестные методы и алгоритмы анализа измерительной информации и постановки диагноза.

Существующие способы диагностики состояния зубчатых передач и подшипников качения в основном базируются на анализе Фурье-спектра, но такой подход недостаточно эффективен, поскольку спектр, представляя усредненные за период частотные характеристики, скрывает неисправности и дефекты. Применяемые аппаратные методы анализа импульсных компонент сложны в реализации и дороги, так как требуют использования специального дорогостоящего оборудования. В то же время они позволяют оценивать лишь общие энергетические параметры импульсных компонент в случайном процессе вибрации, что в эксплуатационной диагностике зубчатых механизмов явно недостаточно.

Таким образом, сегодня актуальны задачи разработки:

- методов и алгоритмов выделения *импульсных компонент* и определения их параметров при переменных нагрузочно-скоростных режимах работы передачи в случайном процессе вибраций, зафиксированных в реальном времени;
- методов получения уточненных вибрационных спектров, очищенных от помех и ложных спектральных составляющих, обусловленных способами получения и обработки цифровой измерительной информации;
- практической методики определения действительной нагруженности зубчатой передачи по амплитудам ударных виброимпульсов (измеряемых, например, на корпусе передачи), генерируемых зацеплением и выходом, таким образом, на *фактический остаточный ресурс* элементов трансмиссионных узлов машин.

**Классификация современных систем диагностирования зубчатых передач мобильных машин в эксплуатации.** На рисунке 6 приведена классификация современных систем диагностирования трансмиссионных узлов машин в эксплуатации, основанная на анализе известных публикаций.

Первый уровень составляют четыре основных признака: 1 — методы диагностирования; 2 — средства диагностирования; 3 — глубина диагностирования; 4 — действие по результатам диагностирования.

Признаки 1 и 2 детализированы более подробно.

Методы диагностирования разделены на 1.1 — прямые динамические (вибрационные), которые могут быть реализованы при установившихся режимах либо неустановившихся режимах (переходные процессы) работы объекта, 1.2 — косвенные методы и 1.3 — статико-динамические.

К косвенным отнесены спектрографический метод (измерение продуктов износа в масле) и энергетические, основанные на анализе текущих показателей потока мощности (по изменению КПД, силы, мощности) и интегральных показателей (по расходу энергии, топлива за определенный промежуток времени или наработки машины).

Прямые динамические (виброакустические) — методы функциональной диагностики, используются в процессе работы объекта.

К типовым статико-динамическим методам отнесены: тепловой — по изменению температуры узла; гидравлический и пневматический — по изменению давления, пульсации, расходу; а также механические методы, в том числе кинематометрия, люфтометрия (зазоры в сопряжениях) и контроль отклонений геометрических параметров деталей.

По используемым средствам системы диагностирования могут быть разделены на 2.1 — бортовые и 2.2 — стационарные.

Бортовые осуществляют непрерывный мониторинг или периодический контроль технического состояния механизма в эксплуатации с использова-



Рисунок 6 — Классификация систем диагностирования трансмиссионных узлов в эксплуатации

нием динамических или статико-динамических методов диагностирования.

Стационарные системы используются при диагностике в ремонтных условиях или при техническом обслуживании (ТО) машин. Они подразделяются на требующие демонтажа узлов (например, специальные обкатные стенды для диагностики трансмиссионных узлов) или не требующие демонтажа, а также требующие или не требующие специальных режимов диагностирования (например, путем приподнимания или установки на беговые барабаны ведущих колес машины).

Признаки 3 и 4 представлены укрупненно. По глубине диагностирования системы разделены на 3.1 — позволяющие осуществлять комплексную оценку трансмиссии и 3.2 — позволяющие диагностировать отдельные компоненты (узлы) трансмиссии, которые в свою очередь подразделяются на системы, позволяющие диагностировать единственный локальный дефект и неисправность детали, и распределенные, позволяющие оценивать интегральную поврежденность детали в целом.

По реализуемым корректирующим действиям выделены 4.1 — активное диагностирование (адаптивная диагностика) с обратным воздействием на неисправность (например, система контроля состояния рабочих поверхностей зубьев зубчатых передач, которая при появлении питтинга добавляет в систему смазки редуктора суспензию с частицами дисульфида молибдена, формирующую микрослой, нивелирующий микротрещины и зазоры, выравнивая поверхность) и 4.2 — пассивное диагностирование (сигнальная диагностика), ограничивающееся сообщением о проблемах

в приводе посредством световых или звуковых сигналов или автоматическим останом.

Анализ существующих методов и инструментальных средств диагностирования зубчатых передач мобильных машин дает основание утверждать, что наиболее перспективным направлением в этой области является развитие методов и средств функциональной вибродиагностики и вибромониторинга, которые позволят осуществлять бортовую, непрерывную и безразборную оценку технического состояния каждого элемента трансмиссии при переменных нагрузочно-скоростных режимах ее работы (в эксплуатации), с автоматической (без участия человека) постановкой диагноза и оценкой остаточного ресурса элементов.

**Разработка бортовой автоматизированной системы вибродиагностики трансмиссионных узлов мобильных машин.** Известные системы и методики вибромониторинга имеют хотя бы один из следующих недостатков:

- возможность диагностирования оборудования, работающего только при квазистационарных и безударных режимах (изменение частоты вращения вала и нагрузки во время диагностирования не должно превышать  $\pm 5\%$ );
- отсутствие алгоритмов отделения информативной составляющей сигнала от вибрации, вызванной внешними воздействиями на объект диагностики;
- низкая степень автоматизации постановки диагноза, обуславливающая необходимость наличия высококвалифицированного в области вибродиагностики персонала;
- невозможность функционирования в режиме реального времени;

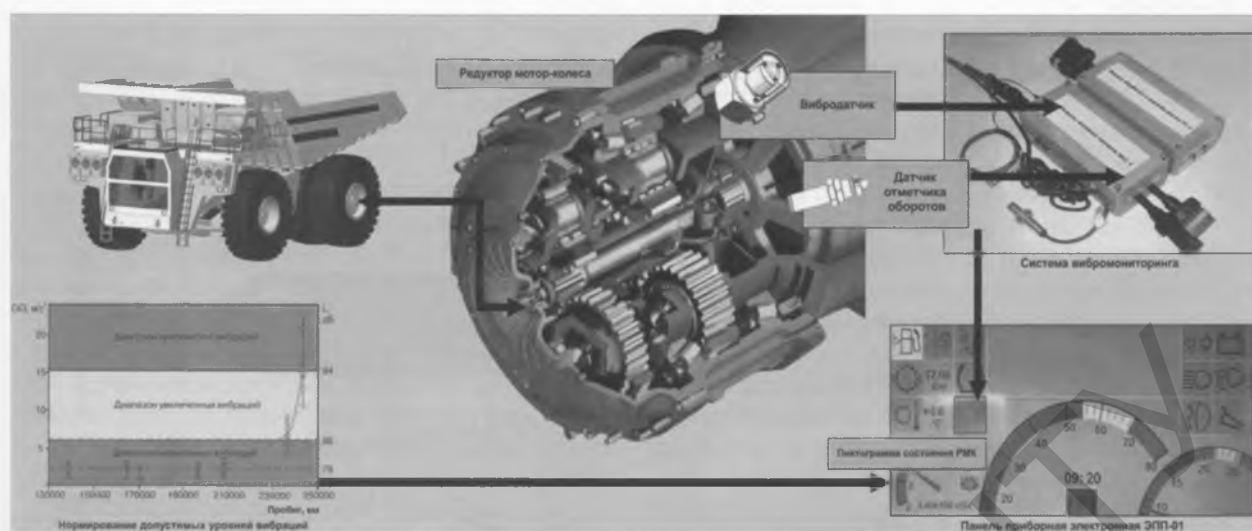


Рисунок 7 — Система бортовой вибродиагностики редукторов мотор-колес самосвалов БелАЗ

- наличие жестких алгоритмов, исключающих возможность изменения программной конфигурации вычислительных средств;

- диагностирование только подшипниковых узлов.

Кроме того, следует отметить высокую стоимость зарубежных аналогов, например, только установка системы HUMS оценивается от 6 до 50 тыс. долл. США [30]; общая стоимость системы мониторинга на базе CSI 6500 с установкой на карьерном экскаваторе составляет порядка 200–250 тыс. долл. США [24] и т. д.

В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси создана бортовая автоматизированная система вибродиагностики редукторов мотор-колес (РМК) большегрузных самосвалов БелАЗ (рисунок 7). Назначение системы — предотвращение аварийного выхода из строя редуктора мотор-колеса в процессе эксплуатации самосвала.

Методология диагностирования и структура построения системы диагностики основана на использовании наиболее перспективных подходов диагностирования (в соответствии с предложенной классификацией) применительно к конкретному объекту. Система по глубине диагностирования (см. рисунок 6, п. 3) позволяет оценивать неисправности отдельных компонентов трансмиссионных узлов, их локальные и распределенные неисправности и дефекты; по корректирующим действиям (п. 4) система относится к пассивной (сигнальной) диагностике; по методу диагностирования (п. 1) — к прямым динамическим (вибрационным) на основе анализа установленных вибрационных процессов; по средствам диагностирования (п. 2) — к бортовой диагностике с периодическим вибромониторингом.

Базовыми в системе вибродиагностики редуктора мотор-колес являются два основных компонента: *аппаратурно-программная часть*, реализующая алгоритмы съема, обработки и анализа измерительной информации с последующей вы-

дачей диагностических решений о техническом состоянии объекта диагностирования, и *объект диагностирования с показателями технического состояния* (хорошее, допустимое, недопустимое). На этой основе строится соответствующая система распознавания состояний (неисправностей), связывающая измеренные вибрационные параметры с конкретными неисправностями РМК.

Проблемы вибродиагностики, связанные с неравномерностью вращения зубчатых колес, решены путем использования разработанных алгоритмов обработки записанных одновременно в реальном масштабе времени вибрационного сигнала и сигнала отметчика оборотов. В результате, временная реализация вибрационного сигнала преобразуется в реализацию по углу поворота вала с диагностируемым зубчатым колесом. Анализ этой реализации с использованием адаптированного к решению конкретной задачи метода синхронного накопления и порядкового анализа, позволяет по результатам одного замера оценивать параметры вибраций на каждом валу редуктора.

На рисунке 8 приведен обобщающий алгоритм обработки параметров вибраций при диагностировании РМК самосвала, реализованный в бортовой системе и позволяющий в режиме реального времени проводить диагностику состояния всех зубчатых колес РМК при эксплуатации машины.

В процессе эксплуатации, система автоматически производит периодический опрос датчиков вибраций левого и правого РМК самосвала. Рассчитывает текущие значения диагностических параметров вибраций, сравнивает их с установленными предельными значениями, определяет, какому уровню технического состояния они принадлежат, сигнализируя об этом водителю пиктограммой соответствующего цвета на приборной панели (см. рисунок 7).

На сегодняшний день применение такой системы обеспечивает:

- оперативный и безразборный контроль текущего состояния всех зубчатых колес РМК;



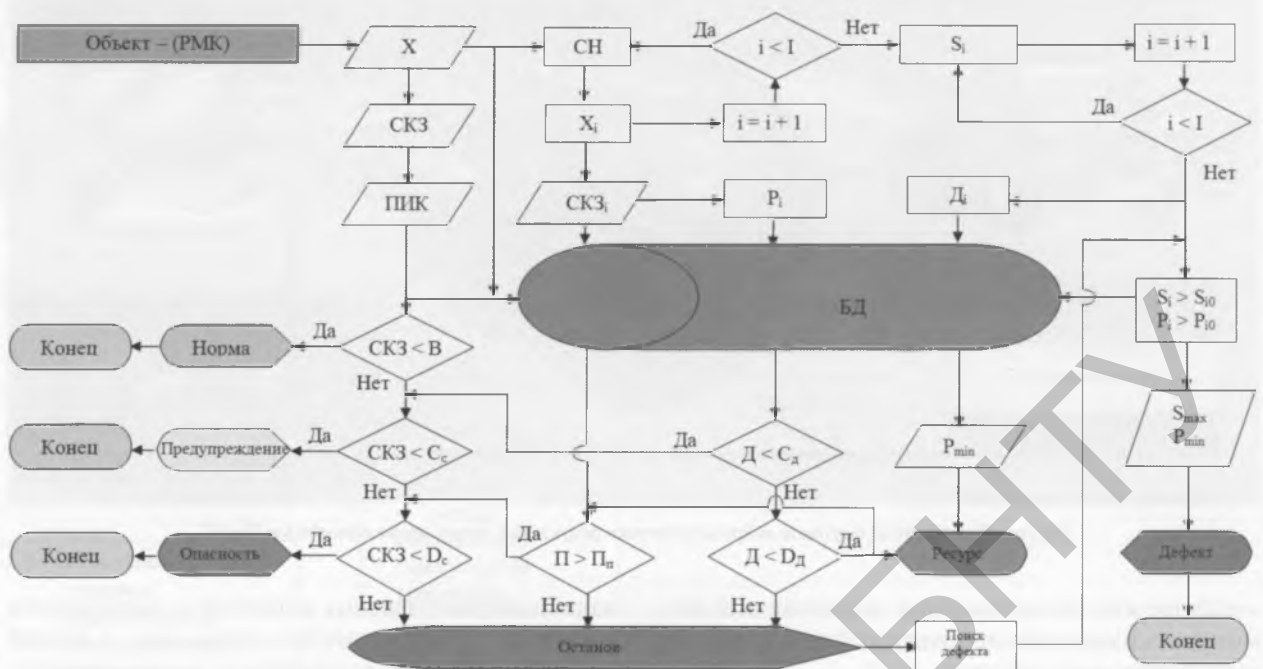


Рисунок 8 — Алгоритм обработки вибраций при диагностировании:

$X$  — текущий вибросигнал;  $I$  — количество зубчатых пар;  $X_i$  — вибрация  $i$ -й зубчатой пары;  $S_i$  — спектр  $i$ -й зубчатой пары;  $S_{i0}$  — маска спектра  $i$ -й зубчатой пары;  $\Pi$  — ПИК-фактор; СКЗ — среднее квадратическое значение;  $D$  — дискриминант; СКЗ <sub>$i$</sub> ,  $D_i$  — СКЗ и дискриминант  $i$ -й зубчатой пары;  $P_i$  — текущий ресурс  $i$ -й зубчатой пары;  $P_{i0}$  — плановый ресурс  $i$ -й зубчатой пары;  $\Pi_n$  — значение предыдущего замера ПИК-фактора;  $B_c$  — граница зоны В для СКЗ;  $C_c$ ,  $C_d$  — границы зоны С для СКЗ и дискриминанта;  $D_c$ ,  $D_d$  — границы зоны D для СКЗ и дискриминанта; БД — база данных; СН — синхронное накопление

- автоматическое срабатывание системы предупреждения водителя;
- получение информации по вибрационным характеристикам элементов РМК для анализа службами техобслуживания;
- облегчение поиска неисправностей и принятия решения о ремонте;
- экономию времени при техобслуживании;
- быструю окупаемость (себестоимость системы не превышает 1 тыс. долл. США).

Испытания системы вибромониторинга на большегрузных самосвалах Полтавского ГОК позволило:

- предупреждать аварийный выход из строя редукторов мотор-колес;
- обеспечить повышение технической готовности самосвала;
- сократить время технического обслуживания машин на 15...17 %;
- сократить время поиска неисправностей РМК в 1,5...2 раза;
- увеличить среднюю наработку на отказ не менее чем на 10...15 %.

В перспективе данная система будет доработана в экспертную, обеспечивая дополнительно автоматическую работу с базой данных вибрационных характеристик РМК, индикацию остаточного ресурса каждой зубчатой передачи редуктора и прогноз потребности в запчастях.

**Перспективные направления развития вибродиагностики применительно к трансмиссионным узлам мобильных машин.** Потребность в бортовых систе-

мах мониторинга и диагностики диктуется, прежде всего, необходимостью сокращения незапланированных простоев машин, расходов на обслуживание, повышения уровня надежности и экономичности эксплуатации техники. Переход к обслуживанию приводных механизмов машин *по фактическому состоянию* обеспечивает повышение безопасности движения, производительности мобильных машин, а также экологичности (за счет снижения содержания токсичных веществ в отработавших газах).

Основные перспективные направления развития вибродиагностики зубчатых передач мобильных машин можно сформулировать следующим образом:

- развитие теоретических положений, базирующихся на исследовании динамической модели упругого удара твердых тел применительно к задачам вибродиагностики, и установление взаимосвязи динамических процессов, обусловленных ударным взаимодействием зубчатых профилей при пересопряжении, с параметрами вибрационных сигналов, регистрируемых на подшипниковых узлах;
- разработка и апробация расчетно-экспериментальных методов оценки параметров технического состояния механических приводов по их виброакустическим характеристикам, при этом выявление природы, характера, уровня, частотного состава, основных резонансов, демпфирования и других характеристик колебательных систем, а также исследование процессов, связанных с распознаванием состояния динамической структуры системы в зависимости от изменения параметров зубчатого

зацепления, изучение закономерностей накопления повреждений и их взаимосвязей с изменениями параметров динамических структур, в условиях переменных нагрузочно-скоростных режимов работы зубчатых механизмов;

- совершенствование методов нормирования вибраций, связанных с классами технических состояний зубчатых механизмов для создания алгоритмов автоматизированного вибромониторинга трансмиссионных систем и их элементов;

- создание и практическое применение работающих в реальном времени бортовых инструментальных средств вибромониторинга технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса трансмиссионных узлов автотракторной техники в условиях стендовых, полигонных испытаний и в эксплуатации;

- создание баз экспериментальных данных по вибрационным характеристикам трансмиссионных узлов машин для повышения достоверности диагноза;

- создание экспертных систем вибродиагностики на основе использования искусственного интеллекта с целью исключения человека из системы диагностирования;

- разработка совмещенных бортовых контрольно-диагностических систем, реализующих функции диспетчеризации и диагностики технического состояния основных критериальных узлов и элементов машины с созданием ее электронной сервисной книги на основе интернет-технологий;

- создание методологии обслуживания машин, связанной с переходом от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по техническому состоянию, базирующейся на внедрении бортовых систем постоянного мониторинга узлов транспортных средств.

При этом необходимо учитывать такие важные проблемные вопросы как себестоимость системы вибродиагностики, уровень затрат на ее обслуживание, надежность функционирования в различных условиях эксплуатации машин, достоверность поставленного диагноза и ряд других вопросов, характерных для бортовой контрольно-диагностической аппаратуры мобильной техники.

**Заключение.** На основе анализа состояния вибродиагностики зубчатых передач и трансмиссионных узлов мобильной техники показаны тенденции развития данного направления и предложена классификация современных методов их диагностирования, охватывающая существующие и перспективные подходы. Это позволяет инициировать развитие соответствующих направлений и практических методик.

Наиболее перспективными и востребованными представляются подходы, которые связаны:

- с дальнейшей индивидуализацией и более детальным изучением объектов, в частности, с исследованиями и оценкой нагруженности каждой пары зацепляющихся зубьев, установлением взаимосвя-

зей между нагруженностью зубьев и параметрами вибраций, измеряемых на корпусе редуктора;

- с созданием и практическим применением работающих в реальном времени бортовых инструментальных средств вибромониторинга технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса узлов в условиях эксплуатации.

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

### Список литературы

1. De Silva, C.W. *Vibration: fundamentals and practice* / C.W. De Silva. — Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. — 1036 p.
2. Мобильная система мониторинга состояния // Деловой и технический журнал фирмы SKF «Evolution». — 2009. — № 2. — С. 24–30.
3. Vibrotest 60 [Electronic resource]. — Mode of access: [http://www.bkvibro.com/fileadmin/mediapool/Internet/PDF-Files/Documentation/Portable\\_measuring\\_instruments/VT-60/vtest60e\\_V445ff.pdf](http://www.bkvibro.com/fileadmin/mediapool/Internet/PDF-Files/Documentation/Portable_measuring_instruments/VT-60/vtest60e_V445ff.pdf). — Date of access: 06.02.2013.
4. National Instruments Collector [Electronic resource]. — Mode of access: <http://www.russia.ni.com>. — Date of access: 06.02.2013.
5. Watchman 8603 Vibration Data Collector [Electronic resource]. — Mode of access: <http://www.ebay.com/itm/NICE-DLI-Watchman-Model-8603-Vibration-Data-Collector-/140828772609>. — Date of access: 06.02.2013.
6. Тараканов, В.М. Системы непрерывного контроля вибрации производства ООО «Диамех 2000» / В.М. Тараканов, О.Б. Скворцов, А.Е. Сушко // Вибрационная диагностика. — 2006. — № 4. — С. 15–21.
7. Барков, А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования: учеб. пособие / А.В. Барков, Н.А. Баркова; М-во образования и науки РФ; С.-Пб. гос. морской техн. ун-т. — СПб.: СПбГМТУ, 2004. — 152 с.
8. ВиКонт [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.vicont.ru/product.html>. — Дата доступа: 06.02.2013.
9. Вибро-Центр [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://vibrocenter.ru/>. — Дата доступа: 06.02.2013.
10. Вибродиагностика. Обзор современных приборов для вибродиагностики [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://sig-nal.narod.ru/new\\_page\\_3.htm](http://sig-nal.narod.ru/new_page_3.htm). — Дата доступа: 06.02.2013.
11. Виброанализаторы и вибросборщики [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.encotes.ru/?q=node/3>. — Дата доступа: 06.02.2013.
12. Анализ современных методов диагностирования компрессорного оборудования нефтегазохимических производств / В.В. Гриб [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт: информ. сб. / ОАО «ЦНИИТЭнефтехим». — М.: ЦНИИТЭнефтехим. — 2002. — № 10. — С.57–65.
13. Software VIBROEXPERT CM-400 [Electronic resource]. — Mode of access: <http://www.bkvibro.com/en/products/safety-monitors/vibrocontrol-4000/software-vibroexpert-cm-400.html>. — Date of access: 06.02.2013.
14. Диагностика зубчатых передач виброакустическими методами. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/pdf/vibro1.pdf>. — Дата доступа 24.03.2008.
15. Мачулов, В.Н. Современные системы технического обслуживания и ремонта оборудования в мировой горнодобывающей отрасли / В.Н. Мачулов // Горная промышленность. — 2013. — № 4(110). — С. 77–80.
16. Власов, Ю.А. Организация системы диагностирования карьерных самосвалов по параметрам работающего масла /

- Ю.А. Власов // Горная промышленность. — 2013. — № 4(110). — С. 91–94.
17. Кудреватых, А.В. Температура масла как параметр диагностики редуктора мотор-колеса карьерного автосамосвала / А.В. Кудреватых // Проблемы карьерного транспорта: материалы 10-й МНПК, Екатеринбург, Ин-т горного дела. — Екатеринбург: Уральск. отд-ние РАН, 2009. — С. 135–138.
  18. Сергеев, В.Ю. Диагностические методы и средства контроля для технического аудита узлов и агрегатов карьерных самосвалов / В.Ю. Сергеев // Горная промышленность. — 2009. — № 6(88). — С. 45–47.
  19. Радкевич, Я.М. Методология оценки качества и управление состоянием горных машин с использованием вибрационных характеристик / Я.М. Радкевич, М.С. Островский, П.Ф. Бойко // Горное оборудование и электромеханика. — 2008. — № 10. — С. 8–12.
  20. Герике, Б.Л. Вибромониторинг горных машин и оборудования / Б.Л. Герике, И.Л. Абрамов, П.Б. Герике. — Кемерово: КГТУ, 2007. — 190 с.
  21. Островский, М.С. Технология вибромониторинга технического состояния горных машин на этапе эксплуатации / М.С. Островский, Я.М. Радкевич, П.Ф. Бойко // Горное оборудование и электромеханика. — 2008. — № 10. — С. 2–8.
  22. Арпабеков, М.И. Технические средства диагностики самоходного горного оборудования и карьерного транспорта / М.И. Арпабеков // Проблемы карьерного транспорта: материалы 10-й МНПК, Екатеринбург, Ин-т горного дела. — Екатеринбург: Уральск. отд-ние РАН, 2009. — С. 19–24.
  23. Хорешок, А.А. Метод комплексного диагностирования редукторов мотор-колес карьерных автосамосвалов в условиях предприятий ОАО «УК Кузбассразрезуголь» / А.А. Хорешок, А.В. Кудреватых // Горная промышленность. — 2010. — № 5(93). — С. 60–64.
  24. Бауэр, Ф. Предотвратить аварийный останов. Онлайн мониторинг вибрации оборудования на примере электрических одноковшовых экскаваторов / Ф. Бауэр // Горная промышленность. — 2013. — № 4(110). — С. 41–44.
  25. Современные системы управления горно-транспортными комплексами / К.Н. Трубецкой [и др.]; под ред. К.Н. Трубецкого. — СПб.: Наука, 2007. — 306 с.
  26. Health and Usage Monitoring Systems HUMS [Electronic resource]. — Mode of access: <http://ezinearticles.com/?Health-and-Usage-Monitoring-Systems-HUMS&id=3582130>. — Date of access: 06.02.2013.
  27. Vibration-Based Techniques for Damage Detection and Health Monitoring of Mechanical Systems / I. C. Adrian. — University of South Carolina, 2002. — 113 p.
  28. Бортовая система контроля диагностическая [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://farnell.by/?page\\_id=285](http://farnell.by/?page_id=285). — Дата доступа: 06.02.2013.
  29. Полеты вертолетов будут контролироваться новейшей разработкой холдинга «Вертолеты России» — перспективной системой безопасности А-HUMS. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.russianhelicopters.acro.ru/press/news/3093/>. — Дата доступа: 06.02.2013.
  30. Grabill, P. Automated Helicopter Vibration Diagnostics for the US Army and National Guard / P. Grabill, J. Berry, L. Grant, J. Porter / American Helicopter Society 57th Annual Forum, Washington, DC, May 9–11, 2001.
  31. Диагностический сканер Cat ET. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.cat.com/>. — Дата доступа: 06.02.2013.
  32. Система (VHMS) HD605-7 [Electronic resource]. — Mode of access: [http://www.komatsuamerica.com/?P=equipment\\*fl=&view\\*prdt\\_id=627\\*info](http://www.komatsuamerica.com/?P=equipment*fl=&view*prdt_id=627*info). — Date of access: 06.02.2013.
  33. Healthy and wise // Mining Magazine. — 2009. — № 1. — Pp. 20–23.
  34. Taking a Pulse // Mining Magazine. — 2011. — № 1. — Pp. 19–23.
  35. Minecare. Maintenance management: рекл. проспект MODULAR MINING SYSTEMS, I N C. — 2013. — 6 с.
  36. Васильев, В. Главное средство борьбы с конкурентами. [Электронный ресурс] / В. Васильев. — Режим доступа [http://www.osl.ru/article/truck/2006\\_05\\_A\\_2006\\_09\\_29-17\\_54\\_24/](http://www.osl.ru/article/truck/2006_05_A_2006_09_29-17_54_24/). — Дата доступа: 02.05.2014.
  37. Антипенко, Г.Л. Влияние единичных дефектов зубьев привода на его динамическую нагруженность / Г.Л. Антипенко, М.Г. Шамбалова // Механика машин, механизмов и материалов. — 2013. — № 3(24). — С. 33–38.
  38. Галямов, П.М. Динамика трогания троллейбуса с адаптивной системой управления тяговым электродвигателем / П.М. Галямов, В.Б. Альгин, С.И. Заиченко // Механика машин, механизмов и материалов. — 2009. — № 1(6). — С. 34–40.
  39. Ишин, Н.Н. Динамика и вибромониторинг зубчатых передач / Н.Н. Ишин. — Минск: Беларус. навука, 2013. — 432 с.
  40. Мигаль, В.Д. Техническая диагностика автомобилей: справ. пособие: в 6 т. / В.Д. Мигаль. — Харьков, 2012. — Т. 3: Методы диагностирования. — 574 с.
  41. Мигаль, В.Д. Техническая диагностика автомобилей: справочное пособие: в 6 т. / В.Д. Мигаль. — Харьков, 2012. — Т. 4: Средства диагностирования. — 547 с.

Ishin N.N., Algin V.B.

### The main directions in development of machine transmission unit diagnostics

The state of vibration diagnostics of technical objects, peculiarities of hardware and software of manufacturers' products, approaches and methods for diagnostics of mobile machines transmission systems are considered. The systems of mobile machines gear diagnostics in operation are analyzed and classified in detail. Special features of the tooth gears functioning, which restrict use of standard vibroacoustic tools for their diagnostics, are separated. On-board automated system aimed for the vibrodiagnostics of motor-in-wheel reducers for dump trucks BelAZ is described. The perspective directions of vibrodiagnostics development in relation to the transmission units of mobile machines are formulated.

**Keywords:** mobile machines, vibrodiagnostics, transmission, tooth gear, hardware and software, systems classification, directions for the development, motor-in-wheel, technical condition

Поступила в редакцию 05.05.2014.