

УДК 629.114.42.622

П.Л. МАРИЕВ, д-р техн. наук; В.И. МОИСЕЕНКО, д-р техн. наук;  
Н.Н. ИШИН, канд. техн. наук; А.С. КЛИМУК

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

**НТЦ «КАРЬЕРНАЯ ТЕХНИКА». НАУЧНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ  
ПРОИЗВОДСТВА***Показана связь науки и производства, раскрыты содержание и результаты наиболее важных совместных исследований, корректирующих техническую политику предприятия.****Ключевые слова:** карьерные самосвалы, глубокие карьеры, горно-транспортные системы, надежность, ресурс, литейная сталь, диагностика, динамическая стабилизация*

Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси и ОАО «БелАЗ» имеют многолетние творческие связи. Созданы и успешно функционируют НТЦ и лаборатории двойного подчинения.

Подразделения НТЦ сотрудничают с объединением по широкому спектру научно-технических проблем.

Совместные исследования по заданиям ОАО «БелАЗ» и его тематике проводятся в рамках Координационной программы сотрудничества, цель которой — создание и исследование новой конкурентоспособной техники. Координатором программы является НТЦ «Карьерная техника» (далее НТЦ «КТ»). Ход выполнения программы регулярно рассматривается на совместном научно-техническом совете Национальной академии наук Беларуси — ОАО «БелАЗ», программа уточняется и расширяется. Так, за 2011 год объем финансирования исследований по ГНТП «Машиностроение», подпрограмма «Карьерная техника» составил свыше миллиарда рублей. Эти работы стали существенным вкладом в обеспечение высокого технического уровня и конкурентоспособности продукции БелАЗ.

Достигнутые результаты можно разделить по двум направлениям: прикладные результаты и научные фундаментальные знания, корректирующие техническую политику предприятия.

К наиболее значимым результатам исследований прикладного характера следует отнести:

**Повышение надежности и ресурса цементируемых и азотированных зубчатых колес редуктора мотор-колеса (РМК).** Увеличение несущей способности рабочих поверхностей зубьев и их сердцевины за счет повышения твердости материала, его структурной и механической однородности (при одновременном устранении коробления во время термообработки и подрезов при шлифовании) является наиболее эффективным путем обеспечения надежности, ресурса и снижения веса крупногабаритных зубчатых колес.

Причины коробления многочисленны и решение проблемы снижения деформаций, к сожалению, и по сей день чаще осуществляется экспериментальным путем. Хотя очевидно, что в основе явления заложены физические закономерности,

связанные со структурными изменениями, происходящими в материале на технологических переделах и в эксплуатации.

Применяемые в настоящее время для зубчатых колес РМК стали 20X2H4A с содержанием никеля до 3,5 % заметно увеличивают деформации деталей при технологических операциях и в эксплуатации. Впервые установлено, что это обусловлено как увеличенным содержанием неустойчивого остаточного аустенита (до 40 %) в цементированном слое, так и его наличием в зернограницных объемах материала даже после операции отпуска [1, 2].

Модифицирование хромоникелевой стали элементами, способствующими ее прокаливаемости, в частности молибденом и ванадием, позволяет снизить содержание никеля в материале в среднем до 2,5 % и, как следствие, аустенита в закаленном слое — до 12 % и тем самым повысить устойчивость материала к короблению (рисунок 1), заметно повысив при этом и прочностные характеристики стали.

По результатам исследований в лаборатории «Проблем надежности и металлоемкости карьерных автосамосвалов большой и особо большой грузоподъемности» создана новая марка стали — 20XH3MA. На новый материал получено положительное решение Национального комитета по интеллектуальной собственности Республики Беларусь на выдачу патента [3]. Производство новой стали освоено в России, сталь внесена в техдокументацию ОАО «БелАЗ» и в необходимых количествах поступает в производство.

Новый материал не уступает по основным прочностным характеристикам стали 20X2H4A и стали SKF253 [4]. Ударная вязкость нового материала превосходит аналогичные характеристики стали 20X2H4A. Его технологические свойства: обрабатываемость, цементируемость и стабильность формы деталей выше, чем у стали 20X2H4A. Эти качества материала позволяют повышать ресурс и надежность деталей, особенно сложной формы, снижать затраты производства.

Компьютерные, стендовые и эксплуатационные исследования позволили установить зависимость твердости поверхности зуба и количество

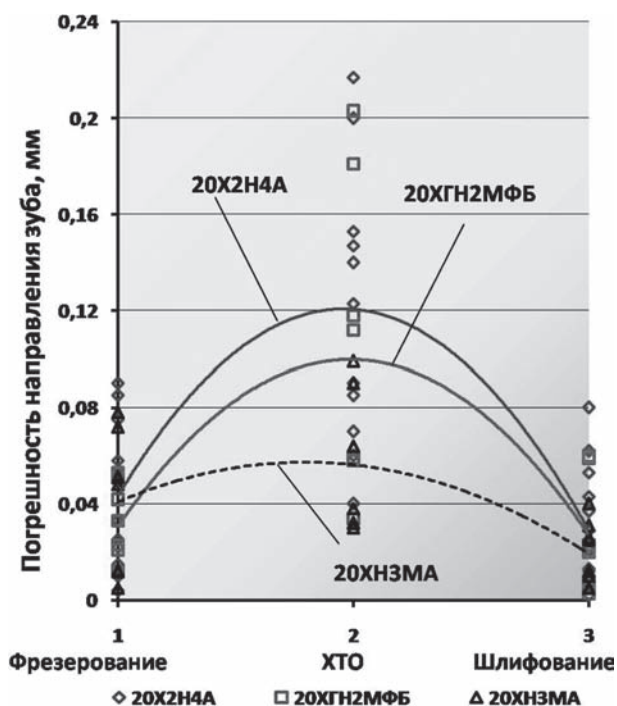


Рисунок 1 — Погрешность направления зуба  $F_v$  зубчатых колес 7519-2405372 из сталей 20Х2Н4А, 20ХГН2МФБ и 20ХНЗМА на разных этапах технологических переделов

циклов нагружения и создать тем самым методику расчета прочности и прогнозирования долговечности цементированных колес, а также управления указанными параметрами [1]. Цементированные зубчатые колеса сегодня не являются «узким» местом РМК карьерных самосвалов.

Выявленные закономерности концентрации и взаимодействия легирующих и примесных элементов в приграничных нанобъемах зерен конструкционных сталей [2] послужили основой разработки, патентования и освоения в серийном производстве ОАО «БелАЗ» принципиально нового вида термообработки — неполной закалки — термически улучшаемых заготовок азотированных крупногабаритных зубчатых колес [5]. При этом в структуре детали формируется строго определенное содержание феррита — 3—5 % — повышенной прочности [6].

Внедрение научной разработки в производство позволило заметно повысить обрабатываемость материала при увеличении его твердости, что привело к увеличению надежности и ресурса колес с внутренним зацеплением, снижению в 4-5 раз аварийности РМК карьерных самосвалов особо большой грузоподъемности (рисунок 2).

**Развитие конструкции и технологии получения литосварных рам карьерных самосвалов.** Принято считать, что в сварных металлоконструкциях масса наплавленного металла сварочных швов не превышает 1 % от массы свариваемых деталей, но на их долю приходится 90 % отказов конструкций, работающих при циклических и ударных нагрузках, особенно при низких температурах [2].

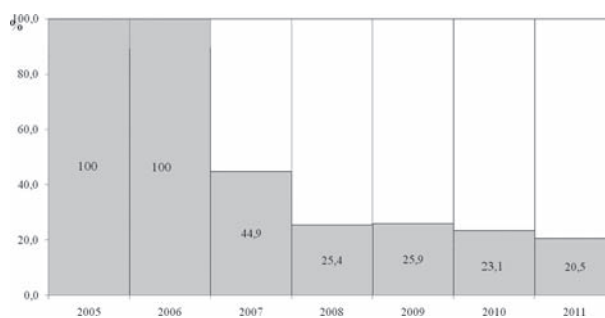


Рисунок 2 — Снижение аварийности планетарных редукторов после введения технологии неполной закалки (с 2007 года) по отношению к периоду изготовления деталей по серийной технологии, обеспечивавшей получение сорбитной структуры заготовки. (Количество аварийных отказов 2005—2006 годов принято за 100 %. Формирование зуба до 2010 года — долбление; с 2010 года — зубофрезерование на станках «Либхер»)

В последние годы при создании карьерных самосвалов резкое повышение прочности сложных по форме сварных конструкций достигается применением отливок, соединяемых сваркой в зоне минимальных напряжений сварной конструкции. Очевидно, что несущие свойства отливок должны быть близки к свойствам основного материала.

В Объединенном институте машиностроения Национальной академии наук Беларуси совместно со специалистами ОАО «БелАЗ» создана специальная литейная сталь 15НМФЛ, запатентованная в Республике Беларусь и Российской Федерации, для высоконагруженных отливок. За почти 15-летний опыт применения отливок из стали 15НМФЛ не было ни одного случая выхода из строя деталей в эксплуатации.

Новый материал обладает высоким сопротивлением локализации пластической деформации при деформировании и потому ему свойственно увеличение прочности при усталости и охрупчивании в условиях эксплуатации. Отливки из новой стали имеют необходимую механическую обрабатываемость и свариваемость, что выгодно отличает литосварные конструкции при ее применении от их аналогов, получаемых с использованием известной стали 08ХГДНМФ.

Проводимый сегодня цикл исследований направлен в первую очередь на достижение плотности и гарантирование прочности литого металла в наиболее нагруженных объемах крупногабаритных отливок весом до 3 т для карьерных самосвалов грузоподъемностью до 360—500 т и включает компьютерные и опытно-промышленные исследования новой номенклатуры деталей (рисунок 3). Виртуальное моделирование конструкции и технологии получения отливок позволяют оптимизировать габариты не только отливок, но и литосварных конструкций в целом (см. рисунок 3).

Переход на литосварные рамы для всех типов карьерных самосвалов обеспечивает безремонтный пробег рам до 1 млн км, что является, несомненно, успехом совместных работ специалистов БелАЗа и сотрудников Объединенного института машиностроения Национальной академии наук Беларуси.

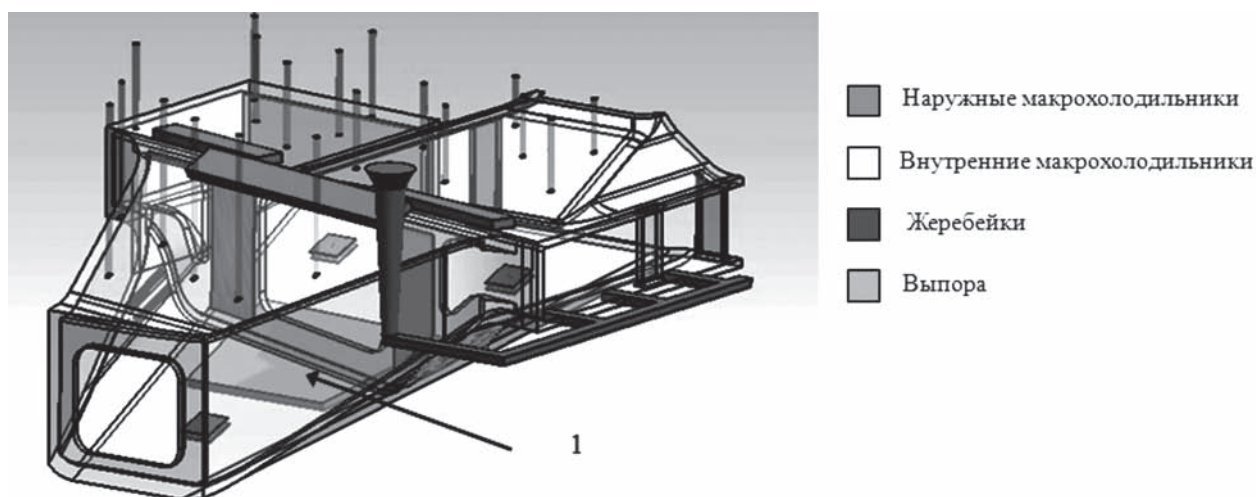


Рисунок 3 — Общий вид 3D-модели «Опоры второй поперечины»

**Совершенствование системы охлаждения двигателей внутреннего сгорания.** Сотрудниками НТЦ «КТ» разработана принципиально новая система охлаждения двигателя внутреннего сгорания с обращенным движением охладителя и заменой осевого вентилятора на центробежный. Эта система позволяет уменьшить фронтальные размеры радиаторов системы охлаждения, снизить ее материалоемкость и уменьшить шум от работы вентилятора. При этом конструкция новой системы охлаждения позволяет исключить импортные комплектующие д.в.с. (импортозамещение).

Разработан новый осевой вентилятор системы охлаждения двигателя карьерного самосвала. Повышение эффективности данного вентилятора было осуществлено за счет оптимизации потока воздуха в области «ступица — лопасть — обечайка». Сравнительные испытания с зарубежными аналогами показали, что данный вентилятор имеет повышенную производительность по нагнетаемому воздуху и меньший на 2 дБ уровень шума. Технология производства данного вентилятора адаптирована к возможности его изготовления на ОАО «БелАЗ» (рисунок 4).

**Диагностика технического состояния РМК.** Перспективными представляются работы по диагностике технического состояния РМК на основе мониторинга вибраций узла при сборке и в эксплуатации. Сотрудниками Объединенного института машиностроения Национальной академии наук Беларуси создан опытный образец системы вибромониторинга РМК. Разработано программное обеспечение, позволяющее проводить обработку и анализ диагностической информации, накапливаемой в памяти системы вибромониторинга при эксплуатации самосвала. Система расширяет возможности бортовой диагностики.

В ходе создания системы были проведены теоретические исследования, связанные с решением задач ударного пересопряжения зубчатых профилей применительно к задачам вибродиагностики.

Исследование ударных процессов в зубчатых передачах и возникающих под действием ударных

сил механических колебаний является динамически неопределенной задачей, так как неизвестными являются параметры ударного импульса. Ударные силы находятся на основе гипотезы Герца, в которой принимается, что в начальный момент удара зубьев деформации и напряжения локализуются в малых, примыкающих к площадкам контакта зубьев объемах материалов. Была предложена динамическая модель зубчатой передачи, описываемая системой из двух дифференциальных уравнений, представляющих ударное взаимодействие зубчатых колес в процессе пересопряжения зубьев. Форма ударного импульса и время его действия находятся интегрированием этой системы как для случая контакта зубьев вдоль образующей, так и для точечного контакта. Это позволило получить спектральное представление периодических действующих ударных импульсов в виде зависимости амплитуд гармонических составляющих от частоты (рисунок 5) [7].

Установление связи между параметрами ударного импульса и виброакустического сигнала, а также сопоставление их спектральных характеристик позволяют при совместном анализе со спек-



Рисунок 4 — Осевой вентилятор

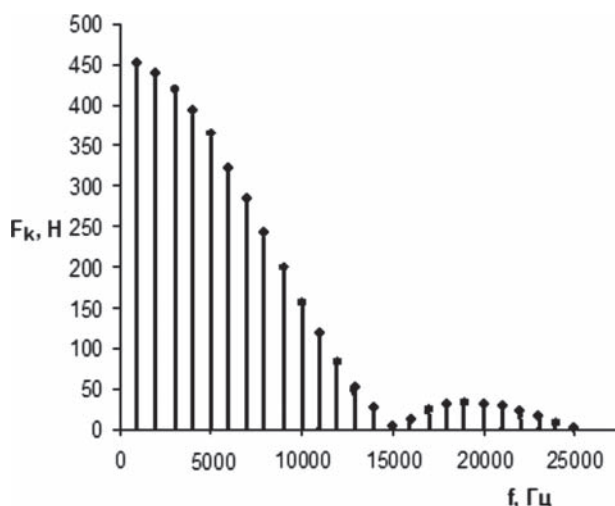


Рисунок 5 — Спектр периодического ударного импульса

ром реального вибрационного сигнала механизма выявить те гармонические составляющие, кратные зубцовой частоте, которые совпадают с областью резонанса механизма и возбуждают в нем интенсивные колебания. По изменениям величин этих составляющих в процессе эксплуатации можно судить о мере повреждения зубчатой пары.

С целью получения исходных данных для создания автоматизированной системы вибромониторинга была разработана и исследована математическая модель РМК.

В результате исследования динамической модели были установлены величины возможных ударных нагрузок, диапазоны частот колебаний элементов РМК, пределы их изменений в зависимости от ус-



Рисунок 7 — Бортовая система вибромониторинга и диагностики РМК самосвала БелАЗ

ловий работы самосвала, связанных с особенностями передачи силового потока в РМК и т. д. Результаты проведенных теоретических исследований были положены в основу создания методических и инструментальных средств вибромониторинга редукторов мотор-колес самосвалов БелАЗ [8].

На рисунке 6 показан алгоритм процесса вибродиагностики РМК, реализуемый в бортовой системе вибромониторинга редуктора мотор-колеса самосвала, внешний вид которой дан на рисунке 7.

На рисунке 8 показаны отдельные, полученные с помощью созданной бортовой системы вибромониторинга, гармонические спектры валов первой ступени РМК БелАЗ. На всех спектрах присутствуют ряды гармоник, характеризующие диагностируемые элементы, в данном случае зубчатые колеса. На рисунке 8 а это гармоники 21, 42, 63 и 84 зубцовой частоты  $f_z$  солнечной шестерни с числом



Рисунок 6 — Алгоритм процесса виброакустической диагностики РМК



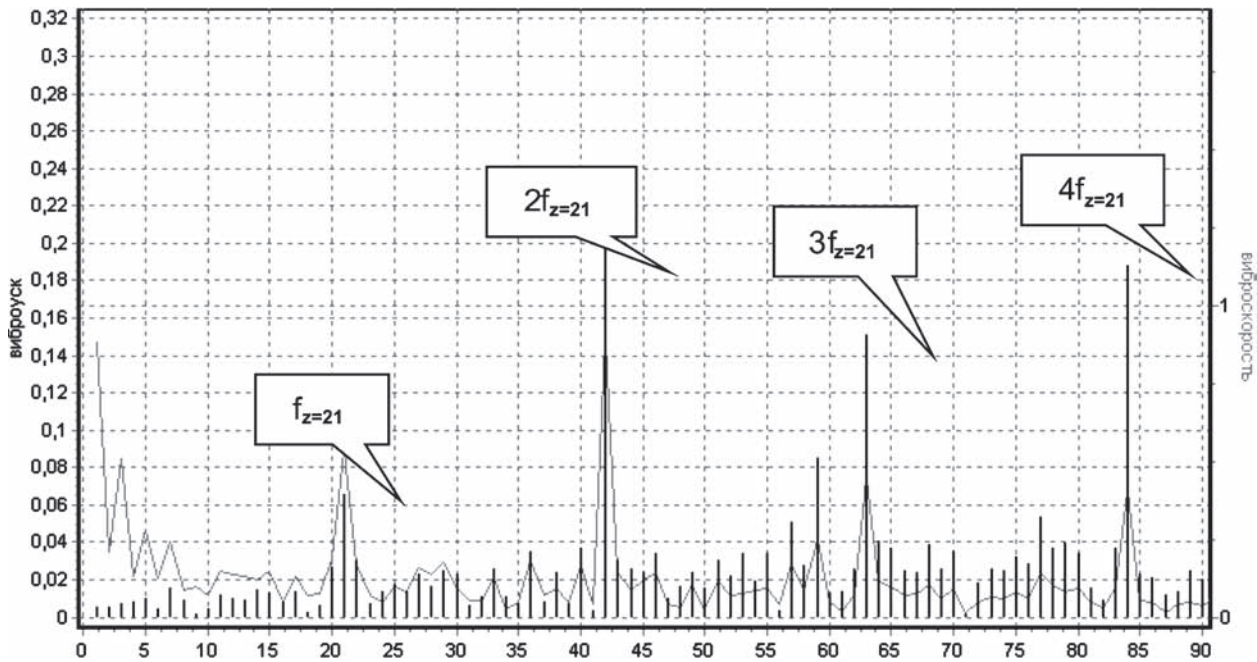
зубьев  $z = 21$  и кратных ей частот  $2f_z$ ,  $3f_z$  и  $4f_z$ . Соответственно, для спутников с числом зубьев  $z = 47$  это гармоники 47, 94, 141 и 188 (см. рисунок 8 б).

Полученные гармонические спектры позволяют либо отслеживать изменение амплитуды соответствующей гармоники на характерных частотах в зависимости от наработки механизма, либо формировать из амплитуд гармонических составляющих комплексные критерии — безразмерные дискриминанты.

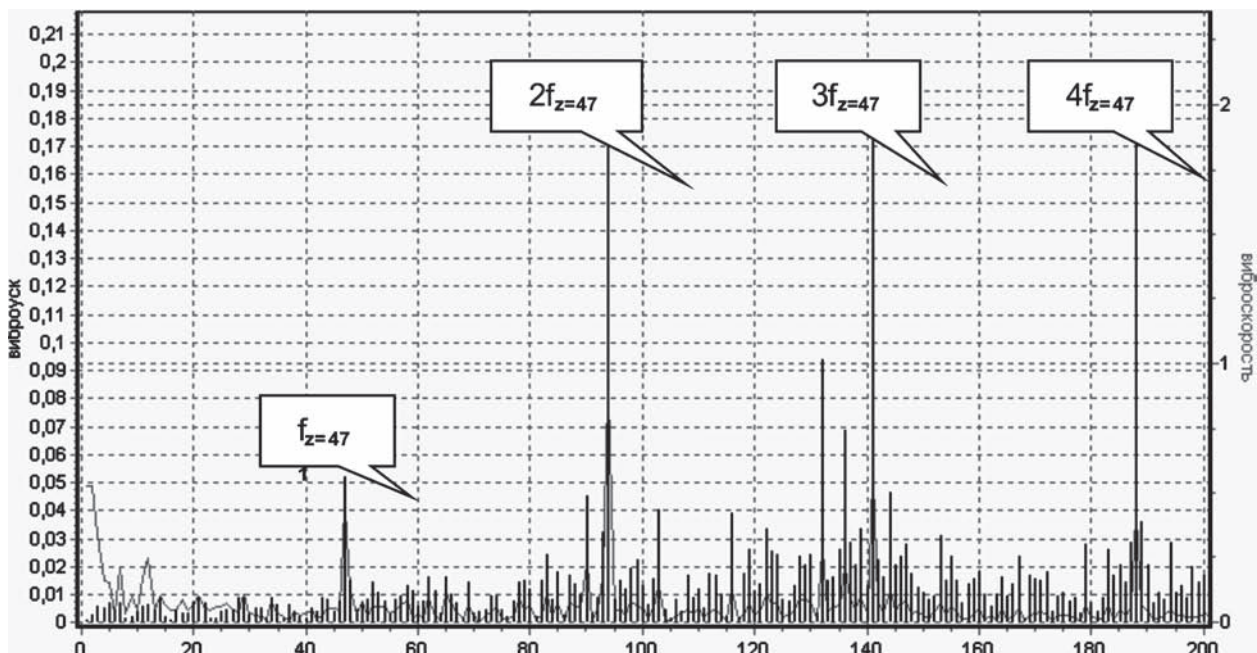
Рисунки 9 и 10 иллюстрируют возможности обнаружения дефектов элементов редуктора пу-

тем определения наличия существенных изменений в гармонических спектрах РМК при повреждении зубчатого колеса. С этой целью в редукторе была проведена замена коронной шестерни ( $z = 117$ ) на дефектную, имеющую скол зуба, и проанализированы спектры виброускорений в четырех контрольных точках РМК до и после проведения замены.

Результаты замеров амплитуды зубцовой частоты (гармоника № 117) в контрольных точках при частоте вращения входного вала РМК 600 мин<sup>-1</sup> показаны на рисунке 9, а дискриминант, содержа-



а



б

Рисунок 8 — Гармонические спектры вибраций валов планетарного ряда РМК: а — спектр солнечной шестерни; б — спектр спутников

ший амплитуды двух первых гармоник зубцовой частоты  $\beta_{f_z} = (S_{f_z} + S_{2f_z})/2$ , замеренных на разных скоростях вращения, — на рисунке 10.

Во всех контрольных точках и на разных скоростных режимах наблюдается превышение на зубцовой частоте уровня вибраций редуктора с дефектным колесом над уровнем вибраций бездефектного редуктора.

Приведенные результаты испытаний свидетельствуют о том, что выбранные в качестве критериев оценки технического состояния элементов редуктора параметры вибраций однозначно зависят от состояния зубчатых колес и могут быть использованы при диагностике и мониторинге РМК в процессе эксплуатации самосвала.

В настоящее время экспериментальные образцы системы вибромониторинга редукторов моторколес проходят апробацию на самосвалах БЕЛАЗ в карьере Полтавского ГОК (Украина) и используются для накопления данных по вибрационным характеристикам РМК в зависимости от их наработки.

**Технология и оборудование для динамической стабилизации размеров фрикционных дисков ММОТ.** Увеличение грузоподъемности карьерных самосвалов сопровождается значительным увеличением нагрузки на их тормозные устройства. Это вызывает необходимость разработки специальных тяжело нагруженных тормозных устройств, к которым относятся многодисковые маслоохлаждаемые тормоза (ММОТ).

В конструкциях ММОТ одновременно применяется до 20—25 фрикционных дисков с наружны-

ми диаметрами до 950 мм, что требует сохранения высокой точности рабочих поверхностей фрикционных дисков во время эксплуатации для обеспечения требуемого тормозного момента.

Возможности повышения точности изготовления фрикционных дисков при использовании известных технологий исчерпаны.

Разработана новая для завода технология динамической стабилизации размеров фрикционных дисков и изготовлено уникальное оборудование с программным управлением (рисунок 11). Совместно с технологическими операциями термической стабилизации позволяет обеспечить неплоскостность дисков в пределах 1,5 мкм на 100 мм.

**Формирование горно-транспортных систем карьеров для отработки глубокозалегающих месторождений.**

С учетом выявленных закономерностей усложнения горно-геологических, климатических и горнотехнических условий в местах разработки полезных ископаемых (углублением карьеров до 1000 м, увеличением продольных уклонов дорог до 30 %, удалением районов разработки в труднодоступные горные регионы с высотой до 4500 м над уровнем моря) проведены исследования и анализ изменения тягово-динамических характеристик, экономичности, производительности, устойчивости, управляемости, тормозных параметров и характеристик карьерных самосвалов, серийно выпускаемых Белорусским автотоматом, в вышеупомянутых условиях работы в глубоких карьерах (рисунок 12). Определены закономерности влияния изменения условий эксплуатации на характеристики современных самосвалов

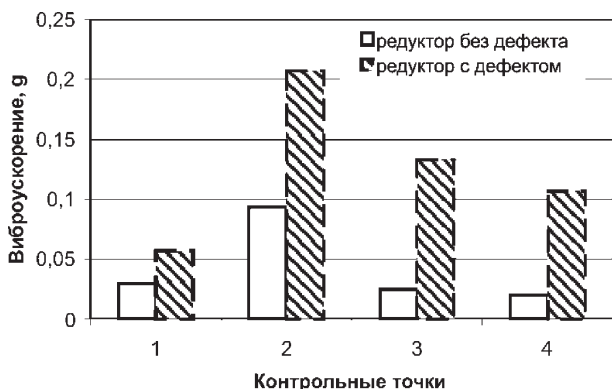


Рисунок 9 — Амплитуда виброускорений редуктора без дефекта и с дефектом на зубцовой частоте в контрольных точках при  $n_1 = 600 \text{ мин}^{-1}$

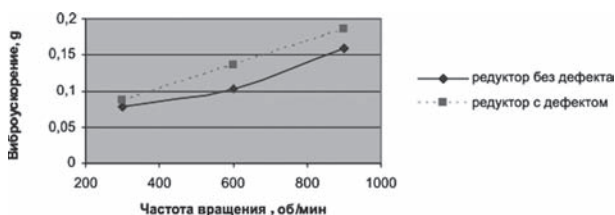


Рисунок 10 — Зависимость дискриминанта  $\beta_{f_z}$  от частоты вращения ведущего вала для дефектного и бездефектного редукторов

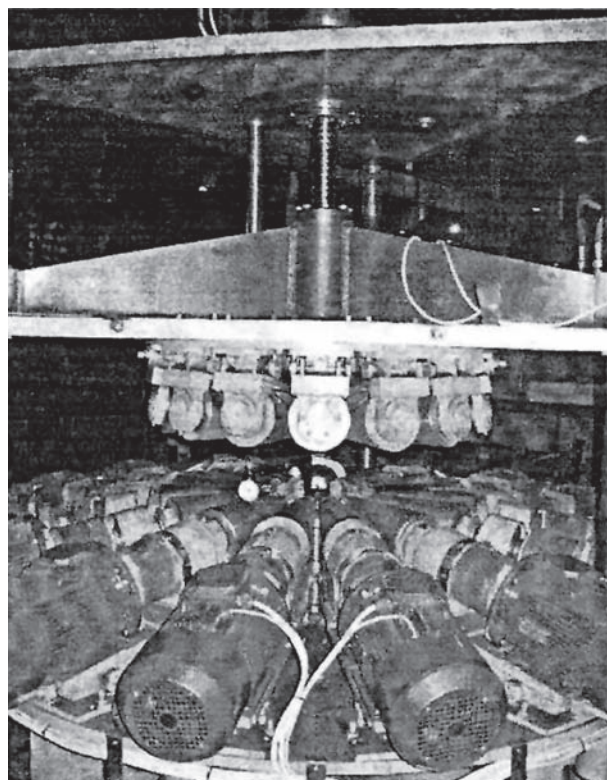


Рисунок 11 — Установка для динамической стабилизации фрикционных дисков 286-076СБ



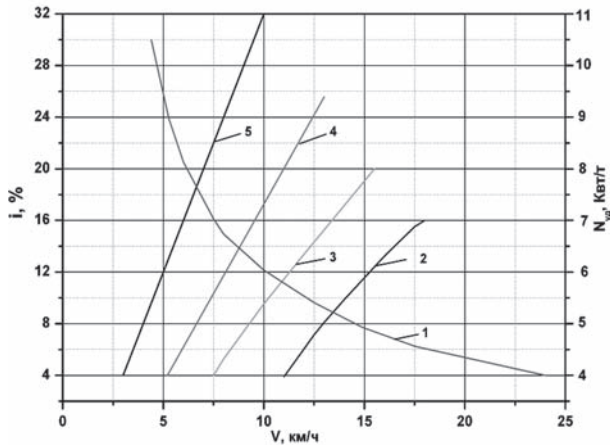


Рисунок 12 — Скоростные характеристики ( $v$ ) карьерного самосвала БелАЗ-7555 (гр. 55 т) в зависимости от уклонов дороги ( $i$ ) и удельной мощности ( $N_{уд}$ ):

- 1 — серийный самосвал ( $N_{уд} = 5,4$  кВт/т) на разных уклонах дорог; 2 — самосвал с разной величиной  $N_{уд}$  на уклоне  $i = 8\%$ ; 3 — самосвал с разной величиной  $N_{уд}$  на уклоне  $i = 12\%$ ; 4 — самосвал с разной величиной  $N_{уд}$  на уклоне  $i = 18\%$ ; 5 — самосвал с разной величиной  $N_{уд}$  на уклоне  $i = 30\%$

(рисунок 13). Выявлены предельные горнотехнические условия, в которых работа карьерных самосвалов современного конструктивного исполнения может быть эффективна, целесообразна и рациональна. Намечены концептуальные пути и методы улучшения эксплуатационных характеристик карьерных самосвалов, обеспечивающие возможность их применения в усложняющихся условиях горных разработок. Сформулированы и обоснованы основные технические требования к безопасности транспортных средств, предназначенных для работы в глубоких карьерах.

Исследования проводились совместно с Институтом горного дела Уральского отделения Российской академии наук.

Координационная программа сотрудничества Национальной академии наук Беларуси и ОАО «БелАЗ» на 2011—2015 годы предусматривает дальнейшие совместные исследования в рамках государственных программ и прямых хозяйственных договоров.

#### Список литературы

1. Провести исследования и разработать рекомендации по выбору конструкционных параметров несущих поверхностей и их подслоев для крупногабаритных азо-

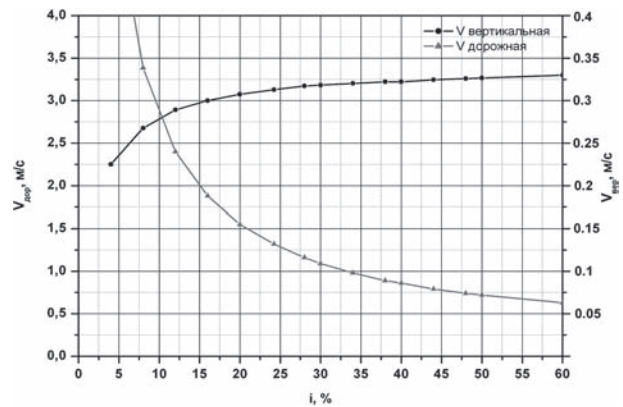


Рисунок 13 — Изменение фактической дорожной ( $v_{доп}$ ) и вертикальной ( $v_{верт}$ ) скорости груженого самосвала БелАЗ-75131 с грузом 130 т ( $N_{уд} = 4,5$  кВт/т) в зависимости от уклонов ( $i$ ) продольного профиля карьерной дороги

- тированных и цементированных зубчатых колес повышенной точности, долговечности и надежности с приемлемой механической обрабатываемостью при снижении затрат производства по энергоносителям и материалам: отчет о НИР / Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси. — Минск, 2006. — № ГР 200732.
2. Моисеенко, В.И. Основы структурной равнопрочности стали и элементов крупногабаритных деталей машин / В.И. Моисеенко, П.Л. Мариев. — Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1999. — 200 с.
  3. Конструкционная легированная сталь: заявка № 2011-0892 от 21.06.11; положит. решение НЦИС Респ. Беларусь от 28.05.12 / Шкатуло Н.Д.
  4. The Black Book. SKF Steel. — Goteborg, 1984. — 367 p.
  5. Способ термической обработки конструкционных легированных азотируемых сталей: заявка № 2010-0659 от 04.05.10; положит. решение НЦИС Респ. Беларусь от 07.03.12 / В. И. Моисеенко [и др.].
  6. Харитончик, Д.И. Крупногабаритные зубчатые колеса с внутренним зацеплением из алюминийсодержащих сталей / Д.И. Харитончик, В.И. Моисеенко. — Минск: Беларус. навука, 2012. — 125 с.
  7. Ишин, Н.Н. Исследование ударного взаимодействия прямозубых зубчатых колес применительно к задачам вибродиагностики. Спектральный анализ ударных импульсов зубчатой передачи / Н.Н. Ишин, А.М. Гоман, А.С. Скороходов // Вес. НАН Беларуси. Сер. фізіка-тэхнічных навук. — 2012. — № 2. — С. 53—59.
  8. Ишин, Н.Н. Методология и аппаратно-программные средства вибромониторинга расходования ресурсов приводных механизмов машин. Достижения физики неразрушающего контроля и технической диагностики / Н.Н. Ишин // Сб. науч. тр. Республиканской НТК по итогам и основным научным результатам выполнения ГКПНИ «Техническая диагностика» (2006—2010 гг.). — Минск, 2011. — С. 31—36.

Mariev P.L., Moiseenko V.I., Ishin N.N., Klimuk A.S.

Scientific and technical center «mining equipment». scientific support of production

The article shows the relationship of science and industry, disclosing the results of the most important joint research, correcting the technical policy of the enterprise.

Поступила в редакцию 21.08.2012.