

Л.И. Андреева

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОЙ ТЕХНИКИ НА ГОРНОДОБЫВАЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ

Применение методов технической диагностики горных машин позволяет получать и обрабатывать информацию о состоянии узлов и агрегатов каждой единицы техники. Наиболее предпочтительным методом контроля технического состояния горной техники является применение метода вибродиагностики, с помощью которого регистрируются параметры механических колебаний «опасных», т.е. наиболее информативных точек узла или детали. При их сравнении появляется возможность обнаружения изменений технического состояния оборудования при увеличении значения одной из составляющих колебательного процесса, что объясняется различием дефектов, которым соответствуют определенные комбинации различных гармоник в общем спектре вибронегруженности узла, агрегата или детали горной машины. Применение методов неразрушающего контроля, в частности, вибродиагностики для определения фактического технического состояния горных машин, позволит увеличить ресурс работы оборудования за счет исключения операций демонтажа и разборки, а также сопутствующих им режимов приработки.

Ключевые слова: экспертное обследование, мониторинг технического состояния, техническое диагностирование, технический ресурс, методы неразрушающего контроля, дефект, вибродиагностика, вибронегруженность, гармоники.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-136-143

Повышение безопасности и надежности эксплуатации горнодобывающей техники позволяет не только поддерживать устойчивость производственного процесса, но и за счет продления срока службы оборудования сокращать расходы на приобретение нового оборудования, добиваться максимально возможного (в конкретных условиях) срока эксплуатации. [1, 2]. Наблюдаемое в последние годы увеличение парка устаревших машин и оборудования усилило актуальность и целесообразность оценки технического состояния горной техники на российских предприятиях горнодо-

бывающей промышленности [3]. Проблема продления срока службы горной техники переросла из частной в государственную и касается всех отраслей промышленности. Как показывают отечественная практика и мировой опыт, эффективность работы предприятия, потребителя сложных машинных комплексов — во многом связана с возможностью безаварийной работы и безопасностью техники. Наиболее эффективен в этих случаях мониторинг технического состояния оборудования [4, 5, 6].

Мониторинг технического состояния горнотранспортного оборудования позво-

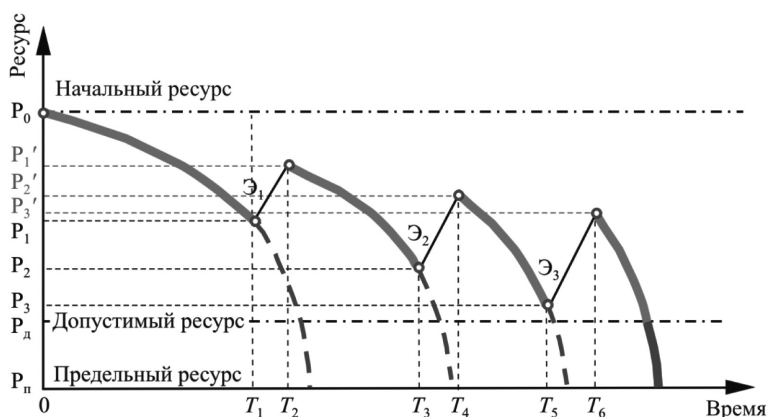


Рис. 1. Этапы продления ресурса горных машин
Fig. 1. Stages of extension of mining machinery life

ляет определить экономически целесообразный срок его эксплуатации (рис. 1).

Начало эксплуатации любого технического устройства характеризуется начальным ресурсом, которому соответствует значение P_0 . При достижении расчетно-нормативного срока эксплуатации (участок $0-T_1$) ресурс технического устройства приближается к допустимому уровню (значение P_1) и перестает отвечать предъявляемым к нему требованиям промышленной безопасности. На этом этапе (точка \mathcal{E}_1) принимается решение либо о выводе технического устройства из эксплуатации, либо о проведении экспертизы, ремонта или модернизации.

На участке T_1-T_2 проводится экспертиза промышленной безопасности, выполняются мероприятия по устранению дефектов, модернизации и ремонту. В результате проведенной модернизации ресурс технического устройства может быть повышен до нового уровня P'_1 . На основании результатов экспертизы, выполне-

ния корректирующих мероприятий по ремонту, модернизации, приведения в соответствие требованиям норм и правил безопасности оборудование допускается к эксплуатации на новый срок (участок T_2-T_3). Дальнейшая эксплуатация постепенно приводит к снижению ресурса технического устройства, и по окончании срока продления (точка \mathcal{E}_2) снова принимается решение либо о выводе его из эксплуатации, либо о проведении следующего цикла экспертизы, и т.д. [7]. При изучении результатов эксплуатации техники установлено, что экономически целесообразные сроки службы канатных экскаваторов составляют 75–100 тыс. рабочих часов, тогда как по гидравлическим экскаваторам и колесным погрузчикам они оцениваются в 30–60 тыс. ч. При этом канатные экскаваторы обеспечивают удельную себестоимость тонны продукции 0,06–0,09 долл. США, гидравлические – 0,08–0,13 долл. США (таблица) [7].

Экономически целесообразные сроки службы экскаваторов Economic life cycles of excavating machines

Тип экскаватора	Срок службы, тыс. рабочих часов	Удельная себестоимость 1 т продукции, долл. США
Канатные	75–100	0,06–0,09
Гидравлические	30–60	0,08–0,13

Техническое диагностирование — эффективное средство получения и обработки информации для оценки технического состояния горнотранспортного оборудования. Наличие такой информации позволяет: устанавливать оптимальный межремонтный период или прогнозировать остаточный ресурс, оперативно определять потребность оборудования в ремонте, проверять качество вновь поступившего оборудования, т.е. комплексно управлять техническим состоянием машин.

Для повышения работоспособности, срока службы, снижения риска аварийного отказа горной техники фирма Caterpillar разработала систему обработки информации VIMS, являющуюся мощным инструментом управления парком машин и предоставляющую операторам, обслуживающему и управленческому персоналу информацию о параметрах и функциях машин [8].

Компьютерная система рассчитана на работу в тяжелых условиях горной промышленности. С этой целью в конструкции машин предусмотрено большое количество разнообразных датчиков. Система включает в себя как бортовые, так и внебортовые системы. Система VIMS информирует оператора о развивающихся опасных состояниях в одной или нескольких системах машины. Кроме того, VIMS извещает о системных отказах в различных электронных блоках машины. В списке событий, хранящемся в памяти компьютера на борту машины, отмечаются дата и время наступления каждого события, его продолжительность и значение соответствующего параметра.

При этом система выдает оператору рекомендации о необходимых действиях, например, изменить режим эксплуатации машины, обратиться в ремонтную мастерскую или немедленно прекратить эксплуатацию машины.

На горнодобывающих предприятиях России в этих целях используются методы общей и локальной (поэлементной) оценки состояния горной техники и ее механизмов. Все диагностические методы основаны на сравнении результатов измерения со значениями порогового уровня нормированных параметров и выявляют или прогнозируют неисправности.

Общее диагностирование выполняется во время ТО, чтобы поддержать рабочее состояние техники путем регулировки узлов и механизмов в допустимых пределах в течение срока службы машины. При этом техническое состояние машины оценивают по обобщенным параметрам, отражающим рабочие характеристики: мощность, производительность, экономичность и др. [9, 10].

Исследования режимов работы и причин отказов металлоконструкций, основных механизмов и электроприводов 530 экскаваторов на разрезах ОАО УК «Кузбассразрезуголь» в течение ряда лет показали, что высокий уровень их динамической нагруженности является главной причиной, определяющей интенсивный расход технического ресурса всех элементов электрических и механических частей экскаватора. Снижению долговечности, безотказности и ремонтпригодности способствуют не только низкие отрицательные температуры, агрессивность окружающей среды, повышенный коррозионный, абразивный и механический износ, высокие вибрации, но и несвоевременное выполнение регулировочных, обслуживающих и ремонтных работ, что особенно важно при среднем износе техники на разрезах отрасли около 70%.

Локальную (поэлементную) диагностику, как правило, проводят для установления степени выработки отдельными узлами машины технического ресурса. По ее результатам направляют на текущий

или капитальный ремонт узлы, агрегаты и машины. Методы контроля, используемые при локальной оценке технического состояния машин, связаны с изменением внешних размеров деталей, а также с выявлением внутренних дефектов. Во втором случае используются методы неразрушающего контроля (вихревых токов, магнитный метод, ультразвуковая дефектоскопия и др.), направленные на поиск уже развитых дефектов.

Из приведенных методов поэлементного контроля наиболее приемлемым для более детального определения состояния горной техники является вибродиагностика, при которой могут быть использованы как специальные, так и стандартные виброизмерительные системы. [7, 11, 12].

Суть этого метода заключается в регистрации и анализе параметров механических колебаний «опасных» (информативных) точек механизма. Из возможных измеряемых значений, а именно амплитуды перемещений S_a , скорости колебаний V , ускорения a и т.д., стандартами ISO 2372, ISO 3945 и VDI 2056 рекомендуется использовать для оценки технического состояния скорость колебаний (виброскорость) — V , мм/с, поскольку этот параметр наиболее полно характеризует энергию колебательного процесса и имеет наименьшую вариабельность.

Для гармонических колебаний, а также для колебаний, представляющих суперпозицию гармоник с различными частотами, величиной, характеризующей интенсивность вибрации, является среднее квадратическое значение (СКЗ) виброскорости:

$$V_e = 1/N \sqrt{\sum_1^N V_i^2}, \quad (1)$$

где V_e — эффективное значение виброскорости; V_i — амплитуда i -компоненты виброскорости; N — количество компонент выборки.

Если регистрируются негармонические периодические или непериодические колебания, то эффективная величина виброскорости определяется как СКЗ мгновенных значений:

$$V_e = 1/T \sqrt{\int_t^{t+T} V(t) dt}, \quad (2)$$

где T — период; t — время (точка на временном интервале); V — мгновенное значение функции виброскорости.

При биениях (пульсациях) вместо определения эффективного значения виброскорости по уравнениям (1) или (2) должно быть использовано выражение:

$$V_e = 1/2 \sqrt{V_{\max}^2 + V_{\min}^2}, \quad (3)$$

где V_{\max} — максимальное значение виброскорости; V_{\min} — минимальное значение виброскорости.

На основе результатов только широкополосных измерений (например, в диапазоне 10—1000 Гц по ISO 2372) нельзя обнаружить изменения состояния машинного оборудования до того, как увеличивающаяся амплитуда определенной гармоники достигнет уровня составляющей с самой большой амплитудой (обычно на частоте вращения ротора) в рассматриваемом частотном диапазоне.

Путем сравнения спектров механических колебаний можно обнаружить изменения технического состояния оборудования сразу же после увеличения уровня одной из компонент колебательного процесса. Это объясняется тем, что различным конкретным дефектам соответствуют определенные комбинации различных гармоник в общем спектре вибронагруженности.

При анализе данных, полученных при первичных обследованиях экскаваторов в ОАО «УК «Кузбассразрезуголь», выявлено, что до 80% всех отказов горной техники связано с износом механического и электрического оборудования (редукторы, электродвигатели и др.). Износ со-

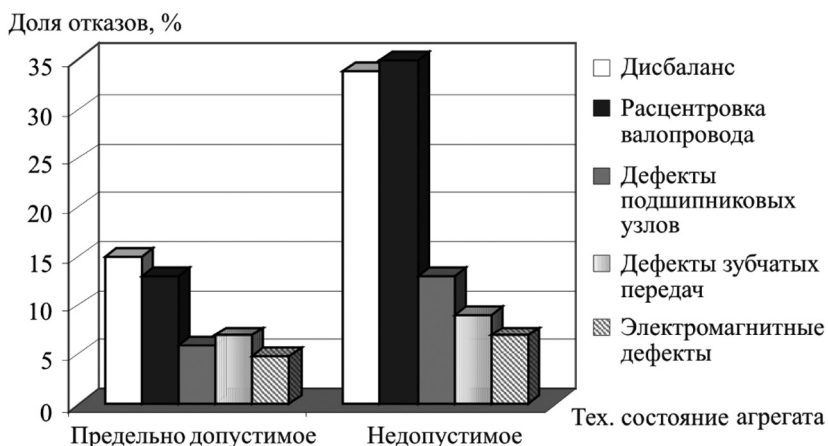


Рис. 2. Характерные дефекты агрегатов экскаваторной техники
Fig. 2. Typical defects of units of excavating equipment

проводится повышением уровня вибрации узлов и агрегатов. Основными дефектами являются: дисбаланс ротора; расцентровка валов агрегата; дефекты подшипников узлов (перекосы, ослабление посадки, износовые процессы); дефекты зубчатых передач (нарушение геометрии зуба, смещение линии вала); различные дефекты электромагнитных систем (перекос фаз, смещение в магнитном поле и т.д.). В большинстве случаев, как установлено, выявленные дефекты являются следствием нарушения технологии ремонта, и лишь небольшое количество механизмов переходит в недопустимое техническое состояние только по причинам, вызванным постепенными процессами износа.

После устранения выявленных прогрессирующих и зарождающихся дефектов было проведено повторное обследование с целью контроля качества выполненных ремонтных работ и динамики выявленных, но не устраненных дефектов. В результате были получены данные, позволяющие сделать вывод о перераспределении оценок технического состояния агрегатов. При лабораторной обработке результатов вибродиагностических обследований, проведенных

в АО «Черниговец», были выявлены группы характерных дефектов динамически нагруженного оборудования (рис. 2) [7].

Рассмотрим некоторые характерные дефекты агрегатов экскаваторов, эксплуатируемых в АО «Черниговец». Так при исследовании, редуктора механизма поворота на всех поврежденных шестернях обнаружен питтинг — выкрашивание рабочей поверхности зуба. При идеальном зацеплении прямозубых шестерен контакт должен быть линейным. При перекосе зацепления контакт становится точечным, значительно увеличиваются контактные напряжения, которые и приводят к повреждению зубьев. Первопричинами аварийного состояния агрегатов могут являться эксплуатация техники с повышенной нагрузкой, некачественное проведение работ по ремонтному обслуживанию, технологическая наследственность (остаточные напряжения) и прочие внешние факторы.

Характерен пример развития дефекта подшипника на генераторе подъема экскаватора ЭКГ-5А. Дисбаланс якоря генератора в течение шести месяцев его работы привел к разрушению подшипника генератора, о чем свидетельствует рост гармонических составляющих.

Внедрение системы вибродиагностики в АО «Черниговец» позволило увеличить ресурс работы оборудования на 30% за счет исключения предупредительных разборок и сопутствующих им режимов приработки.

С использованием автоматизированных систем и компьютерной техники появились новые методы, включающие в себя комплексную оценку состояния оборудования, учитывающие многообразие условий эксплуатации горной техники и воздействующие на нее факторы: режим работы, нагрузки на забой, горно-геологические условия, уровень запыленности, влажность, температура и вибрация.

Так, использование персональных компьютеров, благодаря применению численных методов, позволяет изучать поведение имитационных моделей рабочего процесса механизма (двигателя, редуктора, масляного насоса и других агрегатов) в течение продолжительного времени, оценивать износ отдельных узлов, деталей, а также изменение кинематических и динамических свойств механизма в целом (например, по уровню вибрации в определенных зонах).

Использование вибромониторинга для определения реальной долговечности агрегатов с вращающимися частями и диагностики их текущего состояния позволяет, кроме своевременного выявления причин высокой вибрации, производить регулировку (балансировку) узлов в собственных опорах или на балансировочных станках.

По сравнению с традиционными методами обслуживания оборудования внедрение вибромониторинга дает следующие преимущества:

- своевременное предупреждение аварийных ситуаций;
- увеличение времени производственного использования машин;
- уменьшение времени и расходов на техобслуживание и ремонт.

При создании автоматизированных систем управления горной техникой возникает необходимость разработки, освоения средств и систем технической диагностики, позволяющих использовать эффективные методы технического обслуживания. Так, преобладающим видом повреждений механизмов, стрел и рукояти экскаваторов, в том числе на зарубежных экскаваторах, является усталостный, а для электрических машин (изоляция обмоток), полупроводниковых и электромагнитных аппаратов — термо-вибромеханический, обнаружить зарождение и развитие которых можно только косвенно [13].

Таким образом, адаптивная горная техника, оснащенная достаточным количеством датчиков, сможет предоставлять обслуживающему персоналу значительный объем диагностической информации о времени, месте и причинах неисправностей.

Таким образом, техническое диагностирование дает возможность:

- своевременно обнаружить и устранить дефекты;
- повысить техническую готовность горных машин в среднем на 18—25%;
- исключить необоснованные разборочные работы, что позволяет сохранить технический ресурс элементов (деталей) машин;
- обеспечить полную выработку ресурса (в настоящее время до 55% деталей направляются в ремонт с недоиспользованным ресурсом);
- обеспечить работу машин с оптимальной регулировкой, что позволяет снизить расход ГСМ и электроэнергии;
- повысить безопасность работы за счет частых ревизий и контроля узлов и агрегатов;
- увеличить ресурс работы оборудования до 30—35% за счет исключения необоснованных разборок и сопутствующих им режимов приработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева Л. И., Браило Д. П., Гитнер С. Н., Лунев С. Н. Экономика ремонтного производства // Уголь. — 2016. — № 1. — С. 45–46.
2. Глебов А. В., Репин П. А. Оценка эффективности применения мехлопат и гидравлических экскаваторов в условиях Кузбасса // Горное оборудование и электротехника. — 2013. — № 6. — С. 20–22.
3. Андреева Л. И. Возможности повышения эффективности использования ресурсов в ремонтном производстве // Проблемы недропользования. — 2015. — Вып. 1(4). — С. 134–141.
4. Иванов С. Л., Звонарев И. Е., Шишлянников Д. И., Бурак А. Я., Николаев В. М. Оценка остаточного ресурса крупномодульных зубчатых колес карьерных экскаваторов // Горное оборудование и электротехника. — 2013. — № 11. — С. 28–33.
5. Шибанов Д. А., Шишлянников Д. И., Иванова П. В., Иванов С. Л. Комплексная оценка факторов, определяющих наработку экскаваторов ЭКГ новой продуктовой линейки производства «ИЗ-КАРТЭКС» // Горное оборудование и электротехника. — 2015. — № 118. — С. 3–9.
6. Козярук А. Е., Жуковский Ю. Л. Система обслуживания электромеханического оборудования машин и механизмов по фактическому состоянию // Горное оборудование и электротехника. — 2014. — № 10(107). — С. 8–14.
7. Андреева Л. И. Методология формирования технического сервиса горно-транспортного оборудования на угледобывающем предприятии: дис. д-ра. техн. наук. — Екатеринбург, 2004. — 297 с.
8. Монсини К. Р. Концепция технического обслуживания горных машин // Горный журнал. 1998. — № 11/12. — С. 66–70.
9. Benbouzid M. E. N., Vieira M., Theys C. Induction motors' faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques // IEEE Transaction on Power Electronics. 1999. Vol. 14. No. 1. Pp. 14–22.
10. Schoen R. R., Lin B. K., Habetter F. G., Shlog H. J., Farag S. An Unsupervised On-line System for Induction Motor Fault Detection Using Stator Current Monitoring // IEEE-IAS Transactions, November/December, Vol. 31, No 6, 1995, pp. 1280–1286.
11. Большунова О. М. Диагностика технического состояния асинхронных электродвигателей горных машин // Горное оборудование и электротехника. — 2016. — № 1(119). — С. 35–37.
12. Хорешок А. А., Богомолов И. Д., Буянкин П. В., Воробьев А. В. Оценка эксплуатационных нагрузок на опорно-поворотное устройство экскаваторов-мехлопат // Горное оборудование и электротехника. — 2014. — № 6(103). — С. 43–46.
13. Decision of problem of repairing and technical servicing of quarry equipment // Australian Mining. — 1995. — 87. — № 4. — pp. 34, 36. **ПАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Андреева Людмила Ивановна — доктор технических наук, главный научный сотрудник, e-mail: tehnoem74@list.ru, Челябинский филиал Института горного дела УрО РАН.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 5, pp. 136–143.

L.I. Andreeva

MACHINERY AVAILABILITY EVALUATION IN MINING

Advisability of evaluating technical state of machinery in mines in Russia is currently conditioned by the increase in number of morally obsolete and overage equipment. Making a decision on investment of capital in maintenance of such equipment requires thorough feasibility evaluation. Methods of machinery diagnostics in mining allow collecting and processing of data on condition of units and assemblies of any equipment. Using such information, it is possible to optimize periods between

repairs, or to predict remaining life of units and parts, to promptly determine maintenance requirements of mining machines and equipment, to check the repair quality and to control mining machinery availability. The most preferred method of mining machinery availability control is vibrodiagnostics. Using this methods, parameters of mechanical vibration at «hazardous», i.e. most informative, point of a unit or a part are recorded and then compared, which allows detecting the change in condition of equipment in case one of the vibration parameters is increased since different defects are connected with certain combinations of harmonics in the spectrum of vibrations of a unit, assembly or a part of a mining machine. The nondestructive control, in particular, vibrodiagnostics of actual state of mining machines will enable extending the life of equipment owing to elimination of disassembling/assembling operations and the related break-in periods.

Key words: expert analysis, availability monitoring, technical diagnostics, technological lifespan, nondestructive control methods, defect, vibrodiagnostics, vibration loading, harmonics.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-136-143

AUTHOR

Andreeva L.I., Doctor of Technical Sciences,
Chief Researcher, e-mail: tehnoem74@list.ru,
Chelyabinsk Branch of Institute of Mining of Ural Branch,
Russian Academy of Sciences,
454048, Chelyabinsk, Russia.

REFERENCES

1. Andreeva L. I., Braylo D. P., Gitner S. N., Lunev S. N. *Ugol'*. 2016, no 1, pp. 45–46.
2. Glebov A. V., Repin P. A. *Gornoe oborudovanie i elektrotehnika*. 2013, no 6, pp. 20–22.
3. Andreeva L. I. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2015. Vyp. 1(4), pp. 134–141.
4. Ivanov S. L., Zvonarev I. E., Shishlyannikov D. I., Burak A. Ya., Nikolaev V. M. *Gornoe oborudovanie i elektrotehnika*. 2013, no 11, pp. 28–33.
5. Shibanov D. A., Shishlyannikov D. I., Ivanova P. V., Ivanov S. L. *Gornoe oborudovanie i elektrotehnika*. 2015, no 118, pp. 3–9.
6. Kozyaruk A. E., Zhukovskiy Yu. L. *Gornoe oborudovanie i elektrotehnika*. 2014, no 10(107), pp. 8–14.
7. Andreeva L. I. *Metodologiya formirovaniya tekhnicheskogo servisa gorno-transportnogo oborudovaniya na ugledobyvayushchem predpriyatii* (Methodology of maintenance service management for mining and transport facilities in coal mines), Doctor's thesis, Ekaterinburg, 2004, 297 p.
8. Monsini K. R. *Gornyy zhurnal*. 1998, no 11/12, pp. 66–70.
9. Benbouzid M. E. N., Vieira M., Theys C. Induction motors' faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques. *IEEE Transaction on Power Electronics*. 1999. Vol. 14. No. 1. Pp. 14–22.
10. Schoen R. R., Lin B. K., Habetter F. G., Shlog H. J., Farag S. An Unsupervised On-line System for Induction Motor Fault Detection Using Stator Current Monitoring. *IEEE-IAS Transactions*, 1995, November/December, Vol. 31, No 6, pp. 1280–1286.
11. Bol'shunova O. M. *Gornoe oborudovanie i elektrotehnika*. 2016, no 1(119), pp. 35–37.
12. Khoreshok A. A., Bogomolov I. D., Buyankin P. V., Vorob'ev A. V. *Gornoe oborudovanie i elektrotehnika*. 2014, no 6(103), pp. 43–46.
13. Decision of problem of repairing and technical servicing of quarry equipment. *Australian Mining*. 1995. 87, no 4. pp. 34, 36.

