

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

С.И. Малафеев¹, С.С. Малафеев²

¹ Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых,
Владимир, Россия, e-mail: simalafeev@gmail.com

² Владимирский политехнический колледж, Владимир, Россия

Аннотация: На основе исторического и логического анализа развития экскаваторной техники определены актуальные задачи и основные направления совершенствования средств управления для электрических карьерных экскаваторов. Внедрение информационных технологий означает переход к новому этапу развития горной техники, в основе которого лежит интеллектуализация в организации производства и качественное совершенствование применяемых средств автоматизации, роботизации и телекоммуникаций. Реализация стратегической программы развития технологии полностью автоматизированной добычи полезных ископаемых «Интеллектуальный карьер» в настоящее время осуществляется путем постепенного совершенствования всех компонентов мехатронных комплексов экскаватора. Ведущая роль в этом процессе принадлежит информационным и управляющим компонентам. Идея создания экскаватора нового поколения подразумевает разработку машины с высоким уровнем организации процессов управления, а также электронного помощника человека в умственной деятельности, который способен заменить группу специалистов. При этом обработанные данные о функционировании экскаватора доступны одновременно всем участникам процесса управления жизненным циклом машины. Это позволит создать новые принципы управления эффективностью, производительностью, надежностью экскаватора. Оценивание уровня деградации, прогнозирование ресурса и обнаружение скрытой информации о нарушениях в состоянии оборудования служат основой организации технического обслуживания для предотвращения аварийных остановов и сокращения экономических потерь от простоев. Ранняя диагностика неисправностей обеспечивает снижение опасности аварий, минимизацию простоев, повышение безопасности работы персонала, снижение расходов на техническое обслуживание, снижение объемов запасных частей и страховых тарифов. Приведены примеры новых технических решений, обеспечивающих повышение эффективности мехатронной системы экскаватора.

Ключевые слова: экскаватор, мехатроника, управление, привод, эффективность, мониторинг, диагностика, телекоммуникации, надежность, ресурс.

Для цитирования: Малафеев С.И., Малафеев С.С. Информационные и управляющие компоненты электрических карьерных экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4. – С. 33–45. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_33.

Information and control elements of electric mining shovels

S.I. Malafeev¹, S.S. Malafeev²

¹ Alexander and Nikolay Stoletovs Vladimir State University, Vladimir, Russia,
e-mail: simalafeev@gmail.com

² Vladimir Polytechnic College, Vladimir, Russia

Abstract: The analysis of history and logic of shoveling machinery development allows identifying the urgent objectives and major trends in improvement of control elements of electric mining shovels. The introduction of information technologies enables transition to the next stage in mining machine engineering based on intellectualization of management and on qualitative advance of automation, robotization and telecommunication facilities. The strategic program for fully automated mineral mining technology of Intelligent Surface Mine is currently implemented through modernization of all components of mechatronic mechanisms of shovels. The lead role in this process belongs to the information and control elements. The idea of engineering a new-generation shovel means designing a machine with large-scale control process management and with creation of an operator's electronic brainwork associate capable to replace a team of executives. The shovel performance data after interpretation are accessible for all participants of control over life cycle of the machine. This can make it possible to elaborate new control principles for effectiveness, capacity and reliability of electric mining shovels. Degradation assessment, life prediction and hidden disfunction detection make a framework for the maintenance support to prevent emergency shutdowns and to reduce economic disbenefit due to unproductive time. Early detection of troubles ensures decreased risk of accidents, minimized down time, enhanced operational safety of personnel, maintenance cost saving, decreased replacement parts coverage and lower underwriting rates. The article gives the examples of new engineering solutions which ensure improved efficiency of mechatronic system in mining shovels.

Key words: mining shovel, mechatronics, control, drive, efficiency, monitoring, trouble-shooting, telecommunication, reliability, endurance.

For citation: Malafeev S.I., Malafeev S.S. Information and control elements of electric mining shovels. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(4):33-45. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_33.

Введение

Начало истории экскаваторной техники обычно относят к началу XV в. и связывают с рассказом о ковшедолбежной землечерпалке для углубления дна каналов и расширения морских гаваней, опубликованном в венецианском издании «Кодекса Джованни Фонтана» 1420 г. Землечерпалки конструкции Леонардо да Винчи — первые экскаваторы-драглайны — использовались при прокладке каналов в Миланской долине. За шесть

столетий экскаваторная техника прошла большой и яркий путь развития. При этом создание и совершенствование машин для земляных работ во все времена было продиктовано практическими потребностями общества и опиралось на достижения прикладных наук своего времени.

В истории экскаваторов можно условно выделить несколько этапов, соответствующих задачам при создании машин и особенностям их решения.

Первый этап развития механических устройств для земляных работ характеризовался использованием в качестве энергетического источника мускульной силы человека и животных [1]. Конструирование механизмов и приспособлений было подчинено задаче увеличения производительности землечерпалок.

Началом второго этапа развития экскаваторов стало использование нового источника энергии для приведения в движение рабочих органов — паровой машины. Первая такая драга была построена при участии изобретателя паровой машины Джеймса Уатта и применена в 1796 г. в английском порту Сандерленд на дноуглубительных работах. На втором этапе, продолжавшемся вплоть до первой половины XX столетия, происходило совершенствование конструкций машин, рабочего оборудования и приводов. На этом этапе были заложены основы конструкций экскаваторов и созданы машины с канатным и гидравлическим приводами [2].

Третий этап развития экскаваторов связан с использованием в качестве энергетических источников двигателей внутреннего сгорания и электрических машин, и его начало можно отнести к первой половине XX в. Приводы большой мощности с эффективными системами управления обеспечили успешное решение актуальной задачи повышения производительности экскаваторов за счет увеличения емкости ковша. В конце XX столетия на добывающих предприятиях работали машины разных типов, в том числе гиганты с объемом ковша более 100 м³.

Экскаваторы — наиболее сложные и энергоемкие машины в современной промышленности. Они работают в тяжелых, а во многих случаях, экстремальных условиях. Нарушения работы при отказах компонентов приводят к простоям и большим экономическим

ущербам [3, 4]. Несмотря на качественное обновление технических средств управления экскаваторами, в том числе основанных на использовании интеллектуальных компонентов, в настоящее время сохраняются традиционная технология и автоматизированное управление погрузкой. Вследствие этого горнодобывающая промышленность — это отрасль экономики с наиболее высокими профессиональными рисками [5]. По данным Управления по безопасности и охране труда при добыче полезных ископаемых MSHA в 2017 г. около 40% летальных исходов и более 30% травматических случаев было связано с работой мобильного оборудования [6]. По результатам исследований, приведенных в [7], в большинстве горнодобывающих компаний разных стран, несмотря на значительные успехи в технологии добычи за последние десятилетия наблюдается снижение производительности труда. Мировая горнодобывающая промышленность потребляет около 11% мировой энергии [8]. Улучшение энергоэффективности и сокращение выбросов парниковых газов являются в настоящее время важнейшими задачами для горнодобывающей промышленности [9, 10].

Смещение приоритетов развития добывающей отрасли промышленности в направлении доминирования информационных технологий означает переход к новому этапу развития горной техники, в основе которого лежит интеллектуализация в организации производства и качественное совершенствование применяемых средств автоматизации, роботизации и телекоммуникаций [11]. Новая технология автоматизированной добычи полезных ископаемых «Интеллектуальный карьер» основана на использовании горных машин нового поколения с высоким уровнем автоматизации, в том числе полностью роботизированных технологических комплексов

[12, 13]. Взаимосвязанные актуальные задачи развития экскаваторной техники на новом этапе — это повышение надежности, безопасности и энергетической эффективности на основе автоматизации.

Исследовательские и проектные работы в указанном направлении в настоящее время активно ведутся как за рубежом, так и в России, и охватывают множество вопросов совершенствования мехатронных систем, технических средств и систем контроля и управления электроэнергетическими процессами, диагностики оборудования и процессов, систем дистанционного управления и контроля, человеко-машинного интерфейса, алгоритмов и программ интеллектуальной обработки данных, повышения надежности и безопасности технических систем и др. [14–16].

В настоящей статье приведены основные результаты совершенствования электрооборудования и систем управления карьерных экскаваторов, достигнутые зарубежными организациями, также выполняемые в компании «Объединенная Энергия» (г. Москва).

Мехатронные комплексы экскаваторов нового поколения

Интеллектуальный экскаватор — это машина с высоким уровнем организации процессов управления, контроля и диагностики, эффективным человеко-машинным и телекоммуникационным интерфейсами, адаптивная к изменяющимся условиям горных работ и гармонично взаимодействующая с системами энергоснабжения, транспорта и автоматизированного управления предприятием [14].

Задача создания автономного экскаватора, способного автоматически загружать горную породу в автосамосвалы без участия человека, постепенно решается различными организациями в мире [15–17]. Основные положения

современной автоматизации экскаватора кратко можно сформулировать следующим образом. Работа экскаватора должна выполняться в соответствии с планом забоя и оптимальным расположением машины. Тактический план выполнения работ, включая принятие обоснованных решений о перемещениях машины и определении места погрузки, формируется автоматически с использованием встроенных датчиков, обеспечивающих построение локальных карт местности. Машина с интеллектуальными функциями должна управлять общей деятельностью в зоне погрузки, включая планирование работ, в том числе прибытие и отгрузку автосамосвалов с погрузочных позиций, планирование вспомогательных операций, например, подчистку забоя, и т.д., выполнять загрузку самосвалов с равномерным распределением материала и полным использованием кузова. Экскаватор должен иметь достаточную ситуационную осведомленность о работе оборудования в его окружении для исключения столкновений, в частности, с загружаемыми самосвалами и бульдозерами, выполняющими работы по уборке забоя. Важной функцией является контроль всех технологических показателей экскаватора, в том числе производительности, расхода электроэнергии, времени цикла, состояния оборудования и др.

В условиях сложных и интенсивных горных работ особую роль играет взаимодействие оператора и техники [18]. Новые технические средства на горных предприятиях расширяют возможности и изменяют характер работы машиниста экскаватора главным образом в отношении информационных функций [15, 16]. Телекоммуникационная система должна обеспечивать взаимодействие экскаватора со всеми участниками его эксплуатации и сопровождения жизненного цикла в режиме on-line.

Мехатронные комплексы для российских экскаваторов нового поколения проектируются и производятся несколькими предприятиями. Структура мехатронных комплексов, предлагаемых компанией «Объединенная Энергия», подробно описана в [14] и включает системы приводов главного движения, электропитания, механических рабочих органов, управления движением, информационно-диагностическую систему, человеко-машинный интерфейс и телекоммуникационную систему.

В электрических приводах главного движения (напора, подъема и поворота), а также хода современных российских экскаваторов используются электрические двигатели переменного тока. Применение асинхронных машин обеспечивает увеличение производительности за счет повышения быстродействия, повышение надежности, снижение эксплуатационных затрат. Двигатели специальной серии АДЧРЭ разработаны для функционирования от преобразователей частоты, имеют встроенные импульсные датчики скорости, датчики температуры обмоток и подшипников. В современных экскаваторах для управления двигателями переменного тока используются транзисторные преобразователи с широтно-импульсной модуляцией [19, 20]. Мехатронные системы экскаваторов выполнены по схеме: активный выпрямитель — инвертор напряжения — асинхронный двигатель.

В электроприводах главного движения применены алгоритмы векторного регулирования скорости асинхронного двигателя. При этом использован принцип трансвекторного управления с ориентацией по полю и адаптивным наблюдателем на основе фильтра Р. Калмана. Управляющая подсистема содержит библиотеку программ, обеспечивающих идентификацию параметров двигателей, автонастройку и модификацию струк-

тур регуляторов при изменении режимов работы. Статические характеристики всех приводов сформированы с учетом вариаций характеристик машиниста и ограничений, обусловленных техническими возможностями электромеханического оборудования. Алгоритмы управления в мехатронных системах отвечают критерию эффективного использования энергетического ресурса. Для этого в приводах использована обратная связь по мощности или мощности потерь, ограничивающая максимальные нагрузки, уменьшающая максимумы тока питающей сети и минимизирующая потери в двигателях при выполнении цикла экскавации [20].

Высокий уровень электромагнитной совместимости в системе электропитания экскаватора обеспечивается за счет использования активных выпрямителей для преобразования рода тока [21]. Коэффициент мощности на первичной обмотке главного понижающего трансформатора поддерживается постоянным или регулируется в зависимости от режима работы. Например, в режиме потребления энергии коэффициент мощности стабилизируется на уровне 0,96 (опережающий ток), а при рекуперации он поддерживается равным 1.

Колебания напряжения на вводе экскаватора, обусловленные в том числе рекуперацией энергии в питающую сеть при работе приводов главного движения, оказывают негативное влияние на работу потребителей, подключенных к трансформатору собственных нужд. С целью оптимизации электропитания вспомогательных электроприводов и электрооборудования собственных нужд используются специальные трехфазные стабилизаторы (мощность 120 кВт). Устройства управления приводами получают электропитание от отдельного преобразователя с дополнительным емкостным накопителем энергии, который в случае

отключения напряжения обеспечивает бесперебойную работу ответственных систем. При использовании стабилизатора за счет высокого качества электроэнергии повышаются надежность работы и ресурс электрооборудования, а также снижается расход электроэнергии благодаря стабилизации напряжения в сети вспомогательного оборудования в рабочем режиме и снижению напряжения при отключенных цепях управления экскаватора.

Информационные, диагностические и телекоммуникационные системы

Высокая цена экскаватора, большие ущербы от простоев и опасности для операторов при авариях определяют необходимость применения эффективного контроля и мониторинга всех компонентов и машины в целом. В системе мониторинга функционально можно выделить три уровня. Первый уровень составляют датчики параметров оборудования и процессов. Второй уровень образуют аппаратные и программные средства обработки данных и идентификации аномалий. Третий уровень — это поддержка принятия решений и сопровождения оборудования, основанные на результатах интеллектуального анализа данных.

Все электрическое и механическое оборудование экскаватора оснащается измерительными преобразователями различных типов, подключенных к модулям расширенного мониторинга, которые образуют первый уровень информационно-диагностической системы (ИДС) экскаватора [22, 23].

ИДС выполняет следующие основные функции [23, 24]:

- определение показателей, характеризующих состояние машины и всех ее компонентов в течение рабочей смены, а также режимы ее работы — нагрузки

силовых компонентов, скорость передвижения, время рабочего цикла и т.д.;

- сбор и обработку выходных сигналов от датчиков процессов и управляющих устройств экскаватора;

- анализ состояния всех компонентов, диагностику, прогнозирование ресурсов;

- сбор данных о состоянии всех систем защиты, формирование предупреждений, обнаружение неисправностей и анализ причин отказов;

- регистрацию аварийных процессов;

- регистрацию и архивирование данных;

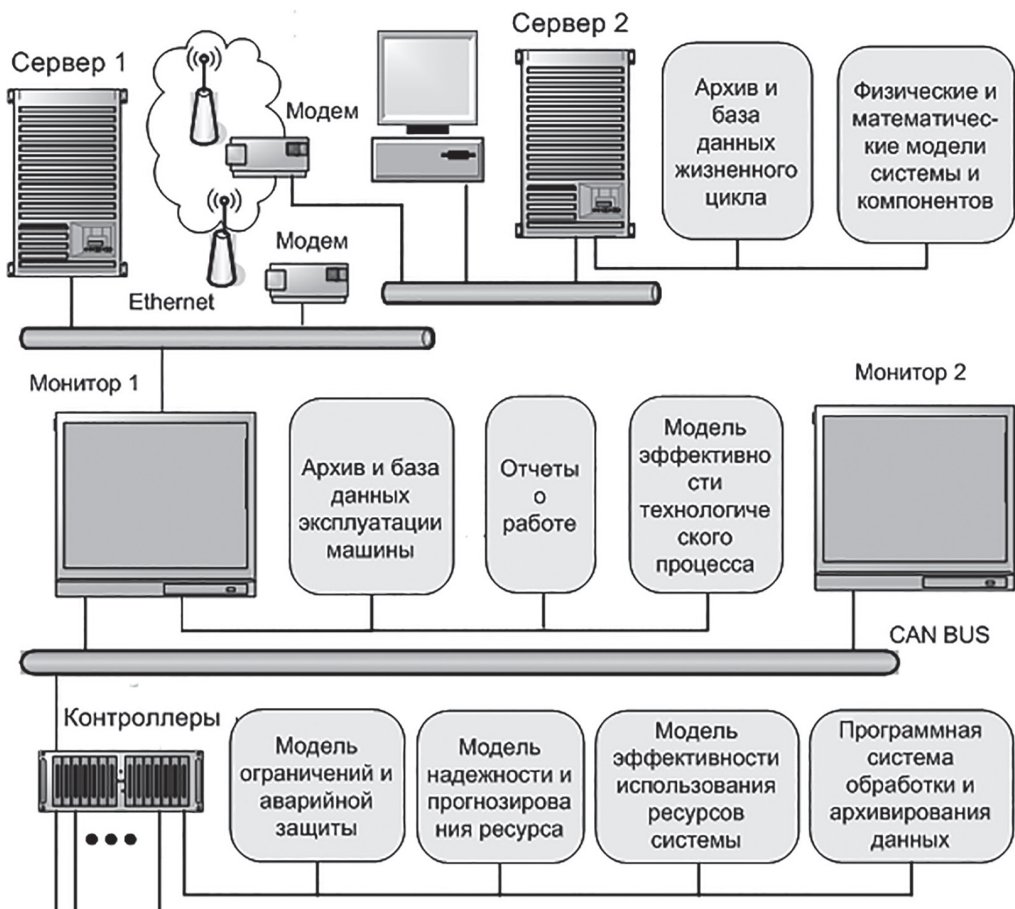
- определение количественных показателей, характеризующих объемы выполненной экскаватором работы, динамику их изменения в течение смены, расход энергии за этот период с определенной дискретностью во времени и др.;

- представление данных о работе компонентов для оператора;

- формирование отчетов о работе машины за смену или другие интервалы времени.

Компанией «Объединенная Энергия» разработана ИДС «Пульсар-7», которая используется на отечественных экскаваторах. На рисунке показана функциональная схема взаимодействия компонентов интеллектуальной системы мониторинга оборудования [22]. В ИДС обрабатываются и хранятся оперативные данные и история работы экскаватора. С этой целью разработаны специальные программы «Электронный машинист» и «Виртуальный экскаватор» [24]. Функция интеллектуальной диагностики имеет особое значение при обнаружении неисправностей оборудования.

На экране монитора ИДС «Пульсар-7» отображаются причины аварийных отключений, идентифицированных интеллектуальной системой диагностики. Обслуживающий персонал имеет



Функциональная схема системы диагностики оборудования экскаватора
 Functional diagram of the excavator equipment diagnostics system

возможность отслеживать все основные показатели работы машины, в том числе: показатели качества и расход электрической энергии, переменные, характеризующие работу активных выпрямителей и приводов, температуру обмоток и подшипников электрических машин и транзисторных преобразователей, трансформаторов и реакторов, масла, воздуха внутри кабины и снаружи экскаватора, угол наклона экскаватора; работу устройств контроля сопротивления изоляции электрооборудования и др. [24].

Система мониторинга позволяет контролировать работу машины в режиме on-line и интегрировать ее в информационную систему верхнего уровня. Телекоммуникационная система, разработанная компанией «Объединенная Энергия», предназначена для удаленного контроля и управления с использованием Интернет с любого персонального компьютера или мобильного устройства при помощи программы удаленного администрирования, установленной на компьютере ИДС.

Программа позволяет наблюдать процессы и управлять экранами системы, а также обеспечивает пересылку файлов-архивов на компьютер или мобильное устройство удаленного пользователя. Оператор в условиях единого информационного пространства получает возможность оперативного взаимодействия со всеми участниками технологического процесса, службами предприятия, а также разработчиком системы управления. Таким образом, оборудование полностью контролируется специалистами соответствующих уровней. Постоянное наблюдение за нагрузочным профилем экскаватора, приводов главного движения и других подсистем дает возможность выявлять нарушения в работе машины. Параметры регулирующих устройств мехатронных систем могут корректироваться дистанционно.

Особый интерес представляет прогнозирование ресурса компонентов машины, включая механические, электро-механические и электронные компоненты [24–27]. Возможности оценивания уровня деградации, прогнозирования ресурса и обнаружения скрытой информации о нарушениях в состоянии оборудования служат основой организации технического обслуживания по состоянию для предотвращения аварийных остановов и сокращения экономических потерь от простоев. Ранняя диагностика неисправностей обеспечивает снижение опасности аварий, минимизацию простоев, повышение безопасности работы персонала, снижение расходов на техническое обслуживание, снижение объемов запасных частей и страховых тарифов.

Документирование аварийных процессов и последующий их подробный анализ позволяют принимать меры по предотвращению аналогичных отказов в дальнейшей работе и вносить коррективы в новые проекты. Благодаря оперативной передаче данных от ИДС на предприятие разработчик обеспечивает использование в проектах актуальной информации об объекте.

Это обстоятельство имеет особое значение для горных машин по ряду причин.

Во-первых, многие новые машины не имеют аналогов, и экспериментальные данные служат единственным источником проверки и уточнения проектных решений.

Во-вторых, при быстром обновлении элементной базы и схмотехнических решений мехатронных систем отсутствуют адекватные модели многих устройств и процессов, что затрудняет проектирование.

В-третьих, программная модификация позволяет оптимизировать имеющиеся устройства и системы на основе

оперативных экспериментальных данных.

Экспертная система на основе анализа данных об эксплуатации и ресурсах компонентов дает возможность сформировать оптимальную стратегию обслуживания и минимизировать затраты на сопровождение жизненного цикла экскаватора [4, 28].

Автоматизированная обработка большого объема данных о состоянии оборудования и аномалиях, а также оценивание ресурса и прогноз дальнейшей работы основаны на физических и математических моделях рабочих процессов и использовании больших вычислительных ресурсов [14, 24]. При этом в интеллектуальной диагностической системе используются различные методы, использующие классический статистический анализ, машинное обучение, нечеткую логику, нейронные сети и др. [29, 30].

Нейросетевое обнаружение и анализ аномалий широко применяются при решении различных диагностических задач для горных машин, например, при непрерывном контроле сопротивления изоляции, вибрационном контроле механических компонентов, обработке изображений и др.

Заключение

Успешность достижения главной цели интеллектуальной карьера — повышение производительности, надежности, безопасности, качества, энергоэффективности процессов возможно только при организации машин, роботов, автоматов и процессов на основе компонентов с адекватными поставленным задачам свойствами. Для этого требуется развитие новых направлений теории и практики автоматического управления горными машинами, учитывающих качественные изменения в элементной базе и возможностях технических сис-

тем. В этом отношении первый приоритет имеет интеллектуализация компонентов, устройств и машин.

Выполненные компанией «Объединенная Энергия» работы по созданию мехатронных комплексов экскаваторов служат технической основой интеллектуализации машин.

Дальнейшие задачи совершенствования новой техники можно сформулировать следующим образом:

- исследование взаимодействия информационного, материального и энергетического ресурсов с целью синтеза критериев эффективного управления;
- развитие методологии взаимодействия участников сопровождения жизненного цикла наукоемкого оборудования в условиях единого информационного пространства;
- исследование и разработка новых технических средств управления горной техникой, эффективных для реализации технологии Интернета вещей;
- интеллектуализация горных машин всех уровней и организации систем автоматизации нового поколения, основанных на новых методах обработки и анализа данных;
- разработка методов и средств непрерывной диагностики компонентов мехатронных систем и процессов их взаимодействия;
- разработка методологии получения значимой информации из большого объема данных, оценивания качества информации, обработки, хранения и защиты данных с учетом приоритетов их ценности;
- изучение эффективных способов организации взаимодействия человека с интеллектуальной автоматикой.

Развитие указанных направлений закладывает основы качественного повышения технического уровня экскаваторной техники на новом этапе ее развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевкун Е. Б. История горного дела. — Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2015. — 244 с.
2. Гайко Г. И. История горной техники. — Алчевск: ДГМИ, 2001. — 134 с.
3. Raza M. A., Frimpong S. Cable shovel stress & fatigue modelling — Causes and Solution Strategies Review // Journal of Powder Metallurgy and Mining. 2013. S1-003. DOI: 10.4172/2168-9806.S1-003.
4. Иванов С. Л., Иванова П. В., Кувшинкин С. Ю. Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации // Записки Горного института. — 2020. — Т. 242. — С. 228–233. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.228.
5. Михина Т. В. Состояние производственного травматизма в горнодобывающей промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 11. — С. 192–199. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-192-199.
6. Shariati H., Yeraliyev A., Terai B., Tafazoli S., Ramezani M. Towards autonomous mining via intelligent excavators / Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshops. 2019. Pp. 26–32. https://openaccess.thecvf.com/content_CVPRW_2019/html/cv4gc/Shariati_Towards_Autonomous_Mining_via_Intelligent_Excavators_CVPRW_2019_paper.html.
8. Lala A., Moyo M., Rehbach S., Sellscho R. Productivity in mining operations: Reversing the downward trend. Metals & Mining Practice. 2015. 13 p. <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/productivity-in-mining-operationsreversing-the-downward-trend>.
9. Awuah-Offei K. Energy efficiency in mining: a review with emphasis on the role of operators in loading and hauling operations // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 117. Pp. 89–97. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.01.035.
10. Levesque M., Millar D., Paraszcak J. Energy and mining — the home truths // Journal of Cleaner Production. 2014. Vol. 84. No 1. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.088.
11. Владимиров Д. Я. Интеллектуальный карьер: Эволюция или революция? // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 45-1. — С. 77–82.
12. Конюх В. Л. Робототехника в горном деле. — Кемерово, 1986. — 60 с.
13. Курцев Б. В., Жданов А. В. Методологические аспекты создания единого информационного пространства на горнодобывающем предприятии // Горный журнал. — 2014. — № 4. — С. 29–31.
14. Малафеев С. И., Тихонов Ю. В. Автоматизация диагностики электрооборудования горных машин на основе моделирования рабочих процессов // Автоматизация в промышленности. — 2014. — № 7. — С. 9–13.
15. Dudley J. J., McAree R. Shovel Load Assist Project — ACARP Project Report C16031. Brisbane Qld Australia: ACARP (Australian Coal Industry Research Program), 2016. 130 p.
16. Chaowasakoo P., Seppälä H., Heikki K., Zhou Q. Digitalization of mine operations: Scenarios to benefit in real-time truck dispatching // International Journal of Mining Science and Technology. 2017. Vol. 27. No 2. Pp. 229–236. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.01.007.
17. Nam Lim S., Soares J., Zhou N. Tooth guard. A vision system for detecting missing tooth in rope mine shovel // 2016 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). 2016. DOI: 10.1109/WACV.2016.7477594
18. Lynas D., Horberry T. Human factors issues with automated mining equipment // Ergonomics Open Journal. 2011. No 4. Pp. 74–80.
19. Bise C. J. (Ed.). Modern American coal mining. Methods and Applications. Society for Mining, Metallurgy and Exploration. 2013. 563 p.
20. Malafeev S. I., Malafeev S. S. On increasing the energy efficiency of electrical mine excavators // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2019. No 377. Article 012016. DOI: 10.1088/1755-3771/012016.

21. Pandit P., Mazumdar J., May T., Koellner W. G. Real-time power quality measurements from a conventional AC dragline // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2010. Vol. 46. No 5. Pp. 1755 – 1763. DOI: 10.1109/TIA.2010.2057470.

22. Шпрехер Д. М., Бабокин Г. И. Система технического диагностирования электромеханических комплексов // *Контроль. Диагностика*. – 2016. – № 3. – С. 52 – 56.

23. Вин Зо Хтэй, Певзнер Л. Д., Темкин И. О. Структура информационной системы шагающего драглайна // *Уголь*. – 2019. – № 1. – С. 34 – 36. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-1-34-36.

24. Malafeev S. I., Malafeev S. S., Tikhonov Y. V. Intelligent diagnostics of mechatronic system components of career excavators in operation // *Studies in Computational Intelligence*. 2018. Vol. 736. Pp. 110 – 116. DOI: 10.1007/978-3-319-66604-4_17.

25. Breido I. V., Sichkarenko A. V., Kotov E. S. Remote monitoring systems for high-voltage substations and mining machines at open pit coal mines // *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52. No 5. Pp. 919 – 926.

26. Бабокин Г. И., Шпрехер Д. М., Колесников Е. Б. Метод повышения безопасной эксплуатации горного электрооборудования путем прогнозирования сопротивления изоляции // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. – № 2. – С. 34 – 45. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-34-45.

27. Popescu F. D., Radu S. M., Kotwica K., Kotwica K., Andras A., Brinas I. K., Dinescu S. Vibration analysis of a bucket wheel excavator boom using rayleigh's damping model // *New Trends in Production Engineering*. 2019. Vol. 2. No 1. Pp. 233 – 241. DOI: 10.2478/ntpe-2019-0024.

28. Enyindah N. C., Amadi R. K. Using diagnosis and life cycle cost to improve reliability of an excavator // *European Journal of Engineering Research and Science*. 2019. Vol. 4. No 3. Pp. 21 – 26. DOI: 10.24018/ejers.2019.4.3.1107.

29. Zhou Q., Chen G., Jiang W., Li K. Automatically detecting excavator anomalies based on machine learning // *Symmetry*. 2019. Vol. 11. No 8. Pp. 1 – 18. DOI: 10.3390/sym11080957.

30. Ali D., Frimpong S. DeepImpact: a deep learning model for whole body vibration control using impact force monitoring // *Neural Computing and Applications*. 2020. Pp. 1 – 24. DOI: 10.1007/s00521-020-05218-6. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Shevkun E. B. *Istoriya gornogo dela* [History of mining], Khabarovsk, Izd-vo TOGU, 2015, 244 p.

2. Gayko G. I. *Istoriya gornoy tekhniki* [History of mining equipment], Alchevsk, DGMI, 2001, 134 p.

3. Raza M. A., Frimpong S. Cable shovel stress & fatigue modelling – Causes and Solution Strategies Review. *Journal of Powder Metallurgy and Mining*. 2013. S1-003. DOI: 10.4172/2168-9806.S1-003.

4. Ivanov S. L., Ivanova P. V., Kuvshinkin S. Yu. Assessment practices mining excavators promising the lineup in a live environment. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 242, pp. 228 – 233. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.228.

5. Mikhina T. V. Accident rate in the mining industry: state-of-the-art. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no 11, pp. 192–199. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-192-199.

6. Shariati H., Yeraliyev A., Terai B., Tafazoli S., Ramezani M. Towards autonomous mining via intelligent excavators. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshops*. 2019. Pp. 26 – 32. https://openaccess.thecvf.com/content_CVPRW_2019/html/cv4gc/Shariati_Towards_Autonomous_Mining_via_Intelligent_Excavators_CVPRW_2019_paper.html.

8. Lala A., Moyo M., Rehbach S., Sellscho R. *Productivity in mining operations: Reversing the downward trend*. *Metals & Mining Practice*. 2015. 13 p. <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/productivity-in-mining-operationsreversing-the-downward-trend>.

9. Awuah-Offei K. Energy efficiency in mining: a review with emphasis on the role of operators in loading and hauling operations. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 117. Pp. 89–97. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.01.035.
10. Levesque M., Millar D., Paraszczak J. Energy and mining – the home truths. *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 84. No 1. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.088.
11. Vladimirov D. Ya. Intelligent mining pit: evolution or revolution? *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no 45-1, pp. 77–82. [In Russ].
12. Konyukh V. L. *Robototekhnika v gornom dele* [Robotics in mining], Kemerovo, 1986, 60 p.
13. Kurtsev B. V., Zhdanov A. V. Methodological aspects of creating a unified information space at a mining enterprise. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no 4, pp. 29–31. [In Russ].
14. Malafeev S. I., Tikhonov Yu. V. Automation of diagnostics of electrical equipment of mining machines based on workflow modeling. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2014, no 7, pp. 9–13. [In Russ].
15. Dudley J. J., McAree R. *Shovel Load Assist Project – ACARP Project Report C16031*. Brisbane Qld Australia: ACARP (Australian Coal Industry Research Program), 2016. 130 p.
16. Chaowasakoo P., Seppälä H., Heikki K., Zhou Q. Digitalization of mine operations: Scenarios to benefit in real-time truck dispatching. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017. Vol. 27. No 2. Pp. 229–236. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.01.007.
17. Nam Lim S., Soares J., Zhou N. Tooth guard. A vision system for detecting missing tooth in rope mine shovel. *2016 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*. 2016. DOI: 10.1109/WACV.2016.7477594.
18. Lynas D., Horberry T. Human factors issues with automated mining equipment. *Ergonomics Open Journal*. 2011. No 4. Pp. 74–80.
19. Bise C. J. (Ed.). Modern American coal mining. Methods and Applications. *Society for Mining, Metallurgy and Exploration*. 2013. 563 p.
20. Malafeev S. I., Malafeev S. S. On increasing the energy efficiency of electrical mine excavators. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2019. No 377. Article 012016. DOI: 10.1088/1755-3771/1/012016.
21. Pandit P., Mazumdar J., May T., Koellner W. G. Real-time power quality measurements from a conventional AC dragline. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2010. Vol. 46. No 5. Pp. 1755–1763. DOI: 10.1109/TIA.2010.2057470.
22. Shpreher D. M., Babokin G. I. System of technical diagnostic of electromechanical complexes. *Kontrol'. Diagnostika*. 2016, no 3, pp. 52–56. [In Russ].
23. Win Zaw Htay, Pevzner L. D., Temkin I. O. The structure of the information system walking dragline. *Ugol'*. 2019, no 1, pp. 34–36. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-1-34-36.
24. Malafeev S. I., Malafeev S. S., Tikhonov Y. V. *Intelligent diagnostics of mechatronic system components of career excavators in operation*. Studies in Computational Intelligence. 2018. Vol. 736. Pp. 110–116. DOI: 10.1007/978-3-319-66604-4_17.
25. Breido I. V., Sichkarenko A. V., Kotov E. S. Remote monitoring systems for high-voltage substations and mining machines at open pit coal mines. *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52. No 5. Pp. 919–926.
26. Babokin G. I., Shprekher D. M., Kolesnikov E. B. Method of improving safe operation of mining machinery electrics by forecasting insulation resistance. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no 2, pp. 34–45. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-34-45.
27. Popescu F. D., Radu S. M., Kotwica K., Kotwica K., Andras A., Brinas I. K. Dinescu S. Vibration analysis of a bucket wheel excavator boom using rayleigh's damping model. *New Trends in Production Engineering*. 2019. Vol. 2. No 1. Pp. 233–241. DOI: 10.2478/ntpe-2019-0024.
28. Enyindah N. C., Amadi R. K. Using diagnosis and life cycle cost to improve reliability of an excavator. *European Journal of Engineering Research and Science*. 2019. Vol. 4. No 3. Pp. 21–26. DOI: 10.24018/ejers.2019.4.3.1107.

29. Zhou Q., Chen G., Jiang W., Li K. Automatically detecting excavator anomalies based on machine learning. *Symmetry*. 2019. Vol. 11. No 8. Pp. 1 – 18. DOI: 10.3390/sym11080957.

30. Ali D., Frimpong S. DeepImpact: a deep learning model for whole body vibration control using impact force monitoring. *Neural Computing and Applications*. 2020. Pp. 1 – 24. DOI: 10.1007/s00521-020-05218-6.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Малафеев Сергей Иванович – д-р техн. наук, профессор, e-mail: simalafeev@gmail.com, Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых,

Малафеев Сергей Сергеевич – канд. техн. наук, преподаватель, Владимирский политехнический колледж, e-mail: Cepg87@gmail.com.

Для контактов: Малафеев С.И., e-mail: simalafeev@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.I. Malafeev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: simalafeev@gmail.com, Alexander and Nikolay Stoletovs Vladimir State University, 600000, Vladimir, Russia,

S.S. Malafeev, Cand. Sci. (Eng.), Lecturer, e-mail: Cepg87@gmail.com, Vladimir Polytechnic College, 600001, Vladimir, Russia.

Corresponding author: S.I. Malafeev, e-mail: simalafeev@gmail.com.

Получена редакцией 27.05.2020; получена после рецензии 12.10.2020; принята к печати 10.03.2021.

Received by the editors 27.05.2020; received after the review 12.10.2020; accepted for printing 10.03.2021.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ МАССИВА КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

(2020, № 12, СБ 47, 12 с.)

*Алексеев Вячеслав Юрьевич*¹ – аспирант, e-mail: slavick.alexeeff@gmail.com,

*Сидоренко Андрей Александрович*¹ – канд. техн. наук, доцент, e-mail: sidorenkoaa@mail.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Обоснована необходимость применения инструментальных методов для прогноза геодинамических явлений и развития геодинамических процессов в массиве горных пород. Представлены результаты анализа области применения различных диагностических методов и их применимости для прогноза геодинамической явлений. Сделаны выводы о перспективе комплексирования геофизических методов для достоверного прогноза изменений энергетического состояния горного массива.

Ключевые слова: геофизические методы диагностики, динамическое явление, геодинамическое явление, угольное месторождение, сейсмоакустика.

DIAGNOSTIC METHODS OF ROCK MASSIF STATE AS THE FORECASTING TOOL FOR GEODYNAMIC PHENOMENA

*V.Yu. Alekseev*¹, Graduate Student, e-mail: slavick.alexeeff@gmail.com,

*A.A. Sidorenko*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: sidorenkoaa@mail.ru,

¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

The relevance of the application of forecasting processes in a rock mass based on instrumental methods for diagnosing geodynamic phenomena is considered. The analysis of the field of application of diagnostic methods and their applicability for forecasting geodynamic phenomena was carried out. Conclusions are drawn on the prospect of integrating geophysical methods for a reliable forecast of changes in the energy state of the rock mass.

Key words: geophysical diagnostic methods, dynamic process, geodynamic process, coal mines, coal deposit, seismic acoustics.