

С.И. Малафеев, А.А. Новгородов

**ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ГОРНЫХ МАШИН
НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ
КОМПАНИИ «ОБЪЕДИНЕННАЯ ЭНЕРГИЯ»**

Рассматриваются направления совершенствования технических средств и систем управления для горных машин на основе функционального и конструктивного объединения электромеханических преобразователей с энергетическими и информационными компонентами с высоким уровнем организации процессов управления. Приводятся результаты проектирования, опыт промышленного производства и эксплуатации мехатронных комплексов для одноковшовых карьерных экскаваторов, буровых станков и земснарядов.

Ключевые слова: мехатроника, экскаватор, буровой станок, гидромеханизация, IGBT-транзистор, электропривод, система управления.

Введение

Добывающая промышленность России характеризуется дальнейшим развитием открытого способа разработки полезных ископаемых. Преобладающее значение открытые разработки приобрели при добыче угля, руд черных и цветных металлов, горно-химического сырья и строительных материалов. Важнейшим условием обеспечения независимой политики страны при освоении сырьевых ресурсов является принципиальная модернизация существующего парка оборудования и создание новых машин, по техническому уровню не уступающих зарубежным образцам. Развитие горных работ возможно только при оснащении карьеров более мощным высокоэффективным горно-транспортным оборудованием. Парк машин, занятых в сфере горного производства открытым способом, требует качественных изменений за счет увеличения единичной мощности машин и грузоподъемности работающих с ними в технологической цепочке средств транспорта; создания безопасного, надежного

в эксплуатации и ремонтпригодного оборудования, обладающего комфортностью для экипажа и удобством в управлении, превосходящего по своим технико-экономическим показателям лучшие отечественные и зарубежные образцы техники.

Тяжелые климатические условия России определяют повышенные требования к горной технике в отношении надежности, удобства эксплуатации и обслуживания.

В настоящей работе представлен анализ современного состояния и основных направлений совершенствования электрооборудования и систем управления для горных машин, основанный на опыте проектирования и промышленного освоения электрооборудования для российских одноковшовых экскаваторов (мехлопат и драглайнов), буровых станков, земснарядов и другой техники ООО «Компания «Объединенная Энергия», г. Москва.

1. Основные задачи совершенствования средств автоматизации для горных машин

Основная цель развития средств автоматизации горной техники — создание научной, технической и технологической базы современного проектирования и производства высокоэффективных машин для добычи полезных ископаемых России на основе сохранения традиций лучших отечественных школ экскаваторостроения, использования новых достижений мехатроники, электропривода, силовой преобразовательной техники, микроэлектроники, информационных технологий и телекоммуникаций.

Основное направление при достижении поставленной цели — разработка и реализация новой концепции проектирования и производства мехатронных комплексов экскаваторов и других машин с учетом современной технологии горных работ, использования новых систем и компонентов управления, жестких требований к эффективности и надежности работы. Добывающие машины: экскаваторы, буровые станки и др., нового поколения, соответствующие этой концепции должны отвечать следующим требованиям.

1. Высокая надежность всех компонентов и машины в целом, безопасность эксплуатации.

2. Максимальная производительность при минимальных потерях во всех компонентах.

3. Интеллектуальная система управления главными и вспомогательными рабочими органами.

4. Высокие энергетические характеристики и электромагнитная совместимость оборудования.

5. Высокая эффективность эксплуатации и низкая стоимость владения оборудованием для потребителей.

6. Высокие эргономические характеристики и малая чувствительность производительности и надежности к вариациям человеческого фактора.

7. Полный контроль и диагностика всех компонентов, компьютерная обработка данных и удаленный мониторинг.

8. Возможность эффективной организации жизненного цикла экскаватора, включая непрерывный мониторинг, сбор и накопление данных об эксплуатации, модернизации и капитальные ремонты.

В основу реализации проекта положены следующие основные подходы.

1. Использование современной идеологии современного производства — CALS-технологий, т.е. системы информационной поддержки жизненного цикла сложных наукоемких изделий: от идеи создания, проектирования, изготовления до контрактных поставок, эксплуатации и утилизации. Реализация концепции CALS предполагает создание единого информационного пространства для всех участников жизненного цикла экскаватора с использованием автоматизированной системы управления данными об изделии.

2. Применение мехатронной технологии проектирования систем управления экскаватора, обеспечивающей оптимальное синергетическое взаимодействие механических, электромеханических, электронных и управляющих компонентов с высоким уровнем организации процессов управления.

3. Системный подход к проектированию экскаватора как основного элемента сложного комплекса взаимосвязанных подсистем транспорта, электроснабжения и автоматизированного управления.

4. Внедрение технологий виртуального предприятия, организация дистанционного контроля и управления, непрерывный мониторинг и автоматизация исследований объектов управления в процессе эксплуатации.

Переход к технике управления нового поколения для горных машин (экскаваторов, буровых станков, автосамосвалов, земснарядов и др.) характеризуется функциональным и конструктивным объединением электромеханических преобразователей с энергетическими и информационными компонентами с высоким уровнем организации процессов управления, т.е. созданием мехатронных систем и комплексов [1]. Синергетический характер интеграции компонентов в мехатронной системе обеспечивает ей новые свойства в плане реализации управляемого движения. Методологической основой разработки мехатронных систем служит параллельное проектирование, т.е. одновременный и взаимосвязанный синтез всех элементов.

Мехатронные комплексы экскаваторов нового поколения включают основные взаимодействующие компоненты: электропитательную систему; электромеханические преобразователи энергии; силовые преобразователи управления двигателями; механизмы и рабочие органы; информационно-измерительную систему; систему управления движением, телекоммуникационную систему и оперативный персонал. Управление приводами осуществляется путем регулирования потока электрической энергии в зависимости от команд машиниста и нагрузок.

Первый признак «умного» экскаватора — электроприводы главного движения с высоким уровнем организации процессов управления. Это включает реализацию принципов гармоничного управления, обеспечивающего наилучшее взаимодействие всех компонентов системы [2], применение адаптивных регуляторов и алгоритмов самонастройки в мехатронных системах; коррекцию и предупреждение ошибочных действий машиниста, защиту от ударов ковша и переподъема, эффективное электропотребление: минимальные потери энергии во всех компонентах, высокий уровень электромагнитной совместимости оборудования, контроль внешней электромагнитной среды, принципиальное снижение информационной нагрузки оператора за счет интеллектуальной обработки данных и информационного взаимодействия компонентов системы [3].

2. Мехатронные системы для экскаваторов

Достижением мехатронной технологии проектирования систем приводов экскаваторов можно считать возможность

формирования желаемых характеристик приводов при различных типах двигателей за счет специальных алгоритмов управления, реализуемых с помощью микроконтроллерных средств. Именно этим объясняется успешное развитие двух систем, не уступающих друг другу, — постоянного и переменного тока, в электроприводах экскаваторов ведущих американских фирм. Применительно к сложившейся в России ситуации предпочтение имеет тот вариант электропривода, который в конкретных условиях обеспечивает максимальную эффективность с учетом капитальных вложений и эксплуатационных затрат.

Перспективный вариант системы электропривода постоянного тока для экскаваторов основан на использовании IGBT-технологии преобразования энергии [4]. Транзисторные широтно-импульсные преобразователи обеспечивают повышение быстродействия приводов и существенное увеличение коэффициента мощности без дополнительных компенсирующих устройств. Такое решение использовано в современных экскаваторах ЭКГ-5, ЭКГ-10, ЭКГ-12, ЭКГ-15, ЭКГ-18Р и ЭКГ-20К.

Электроприводы главного движения (напора, подъема и поворота, хода) выполнены по системе транзисторный преобразователь — двигатель постоянного тока. Для электропитания приводов используется группа из активных выпрямителей, работающих на общую локальную сеть постоянного тока. Выходное напряжение в локальной сети постоянного тока поддерживается постоянным с помощью регулятора напряжения, который также обеспечивает управляемый «мягкий» заряд конденсаторов в звене постоянного тока при включении системы. Главная обратная связь замкнута по напряжению якорной обмотки двигателя. Внутренний подчиненный контур выполняет регулирование тока якорной обмотки двигателя. В системе использованы пропорционально-интегральный регулятор тока и пропорциональный регулятор напряжения. С целью улучшения динамических характеристик привода использованы задатчик интенсивности и нелинейная обратная связь по току. В электроприводе поворота применен специальный алгоритм управления, обеспечивающий безударный выбор зазоров путем изменения параметров задатчика интенсивности в функции тока якорной обмотки. В приводе подъема применена положительная обратная связь по току для обеспечения удержания ковша.

Применение активных выпрямителей в системе управления главными электроприводами экскаватора позволяет принципиально решить проблему электромагнитной совместимости оборудования. Активный выпрямитель можно рассматривать как регулируемый источник напряжения, питающий звено постоянного тока. Напряжение в локальной сети постоянного тока стабилизируется на заданном уровне и практически не зависит от изменений напряжения в сети, в том числе при рекуперации энергии. При этом минимальное значение напряжения в звене постоянного тока должно быть не менее 1,53 от действующего напряжения в сети для исключения протекания тока через обратные диоды IGBT-модулей и влияния этого тока на процессы в сети. Управление вектором тока, потребляемого из сети или отдаваемого в сеть, позволяет регулировать коэффициент мощности, например, поддерживать его на уровне 1,0 (или другом заданном значении) во всех режимах работы машины.

В процессе эксплуатации экскаваторов ЭКГ-12А, ЭКГ-18Р и др. проводилась регистрация процессов с помощью ИДС и цифровых осциллографов, оценивание энергетических и динамических характеристик. В настоящее время данные, поступающие по системе удаленного мониторинга, позволяют постоянно контролировать состояние оборудования и работу экскаваторов.

Коэффициент мощности равен 0,96. При этом основная гармоника тока составляет 97% от действующего значения. Основная гармоника напряжения составляет 99% от его действующего значения.

Энергоемкость экскавации за цикл определялась путем регистрации и математической обработки электрических процессов. Для различных экскаваторов получены значения удельной энергоемкости погрузки за цикл ЭКГ-18Р от $P_{уд0} = 0,21$ кВт×ч/м³ (разрез Талдинский, ОАО «Кузбассразрезуголь») до $P_{уд0} = 0,28$ кВт×ч/м³ (экскаватор ЭКГ-12А, ОАО «Ванадий», Качканар). Удельная энергоемкость, рассчитанная по электропотреблению на основе показаний многофункциональных счетчиков КЭЯ «Знак+» (класс точности 0,5) за различные периоды непрерывной работы (от 9 смен до 1 года) для экскаваторов ЭКГ-18Р на угольных предприятиях Кузбасса составило 0,39 кВт×ч/м³. Для сравнения следует отметить, что

для традиционных машин с приводами по системе генератор — двигатель этот показатель, определенный для различных горно-геологических условий, составляет 0,3–1,24 кВт·ч/м³ [5]. Например, для экскаватора ЭКГ-1500Р на разрезе «Талдинский», удельная энергоемкость составила 0,65 кВт·ч/м³.

В электроприводах переменного тока используются специальные асинхронные двигатели серии АДЧРЭ производства Сафоновского электромеханического завода. Регулирование скорости и момента электроприводов экскаватора происходит путем изменения частоты и напряжения на статорных обмотках приводных двигателей с помощью трехфазных мостовых транзисторных преобразователей. Преобразователи получают питание от общего звена постоянного тока, напряжение на емкостях которого стабилизируется активными выпрямителями. От общего звена постоянного тока питаются: реверсивный мостовой транзисторный преобразователь подъема, преобразователь напора, преобразователь поворота и преобразователь хода, которые работают в режиме ведущий-ведомый.

Система управления мостовым транзисторным инвертором напряжения реализована с использованием векторного принципа подчиненного регулирования скорости асинхронного двигателя с нелинейным ограничением тока, обеспечивающая повышенные энергетические характеристики [6]. Приводы подъема, напора и поворота оснащены импульсными датчиками скорости. Привод хода — бездатчиковый.

На рис. 1 показан внешний вид шкафов управления экскаватором ЭКГ-10 с электроприводами переменного тока.

Для всех отечественных шагающих экскаваторов: ЭШ-6/45, ЭШ-10/70, ЭШ-15/90, ЭШ-20/90 и ЭШ-40/85 и др., разработаны и реализованы новые низковольтные комплектные устройства управления. В системах управления реализованы оригинальные схемотехнические решения: «мягкий пуск» приводных синхронных двигателей, регулирование возбуждения синхронного двигателя по активной мощности приводов главного движения, микроконтроллерная система защиты стрелы от растягивания ковша, компьютерная информационно-диагностическая система и др. [7].



Рис. 1. Преобразователи управления электроприводами переменного тока экскаватора ЭКГ-10

3. Мехатронные системы для буровых станков

Основными подсистемами мехатронного комплекса бурового станка являются мехатронная система вращателя; система управления ходом; компрессорный агрегат; система подачи бурового инструмента.

Для мехатронной системы вращателя обычно используется электродвигатель постоянного тока с тиристорным трехфазным нереверсивным преобразователем, питающим якорную обмотку двигателя, и реверсом по обмотке возбуждения [8]. В микроконтроллерной системе управления скоростью двигателя использована обратная связь по напряжению.

В механизмах хода применяются как двигатели постоянного тока, так и асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором без регулирования скорости. Для электропривода с асинхронным двигателем используется алгоритм плавного пуска с целью уменьшения пусковых токов и выбора зазоров. Мехатронная система с использованием двигателя постоянного тока имеет структуру, аналогичную электроприводу вращателя, обеспечива-

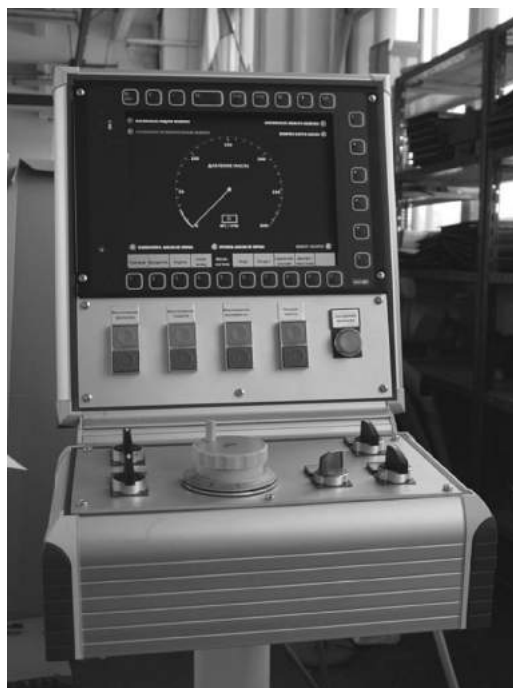


Рис. 2. Пульт управления бурового станка

ет плавный пуск двигателя и стабилизацию заданных значений напряжения, соответствующих 4 фиксированным скоростям гусеничного хода.

Для современных буровых станков СБШ-250 (и аналогичных) разработаны и реализованы электроприводы переменного тока вращателя и хода с использованием специальных асинхронных двигателей производства ПАО «НИПТИЭМ» (г. Владимир) серии АДЧРБ.

Пульт управления буровым станком показан на рис. 2.

4. Электрооборудование и системы управления для земснарядов

Для отечественных земснарядов Цимлянского судомеханического завода и других предприятий аналогичного профиля разработаны и реализуются системы управления всеми подсистемами машины [9]. Специализированный комплект электрооборудо-

вания земснаряда предназначен для распределения и защиты высоковольтной и низковольтной сетей, а также для управления и защиты главных и вспомогательных электроприводов. Все высоковольтное оборудование (6 кВ), размещаемое на берегу, встроено в стандартный контейнер с воздушным (кабельным) вводом и кабельным выводом. Комплектный распределительный пункт, размещаемый на земснаряде, обеспечивает распределение напряжения ~ 6 кВ и управления главными приводами (гидрорыхлителя и грунтонасоса) земснаряда. Автоматизированная система управления земснарядом организована на базе рабочей станции оператора, установленной в диспетчерском центре (операторной). Операторская панель локального мониторинга и управления представляет собой компактный промышленный компьютер со встроенным жидкокристаллическим дисплеем. Для реализации функций управления панель снабжена блоками кнопочного управления и сенсорными экранами. Система мониторинга обеспечивает отображение основных параметров (напряжение и нагрузка) сетей 6 кВ и 380 В, основных пара-



Рис. 3. Рабочее место машиниста земснаряда

метров (нагрузка, температура обмоток) главных приводов, состояние (перегрузка и авария) вспомогательных приводов, технологических параметров (давление, вакуум, расход, плотность) земснаряда и регистрации всех отображаемых параметров в энергонезависимой памяти. Отображение параметров в удобном графическом интерфейсе позволяет оператору контролировать все необходимые параметры.

Сервер, выполненный на базе промышленного компьютера, обеспечивает базу данных реального времени, оперативную и архивную базы данных, передача команд управления контроллерам с верхнего уровня управления, предоставление требуемой информации, поддержку работы радиомодемов для обеспечения взаимодействия с удаленными контроллерами и подсистемами, синхронизацию работы различных подсистем, а также решение ряда других конкретных задач.

5. Интеллектуализация горных машин

Интеллектуальная горная машина — 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 [10].

Создание экскаватора-робота для полностью автоматизированной добычи полезных ископаемых — стратегическая программа, стимулирующая ускоренную разработку и внедрение компонентов интеллектуального управления экскаваторами и другими горными машинами, интеграция которых обеспечит качественное изменение машины для работы в условиях интеллектуального карьера. К таким компонентам относятся:

- мехатронные комплексы с усовершенствованными алгоритмами управления;
- системы интеллектуальной защиты оборудования и персонала;
- информационно-диагностические системы;
- средства и системы телекоммуникаций;
- эффективный человеко-машинный интерфейс;

– программные комплексы обработки, представления и хранения данных.

Все локальные подсистемы экскаватора объединены в единое информационное пространство. Это позволяет устройствам управления различного уровня выполнять свои функции с учетом событий, происходящих в других подсистемах. Одновременно с этим, предполагается наращивание функциональных возможностей каждой локальной подсистемы в отдельности. Атрибутом интеллектуального экскаватора является взаимодействие с единым информационным пространством предприятия, в котором находятся другие машины горно-транспортного комплекса и персонал.

Единое информационное пространство представляет собой совокупность информационно-телекоммуникационных систем и сетей, баз данных, технологий их ведения и использования, функционирующих на основе единых принципов и по общим правилам, обеспечивающим информационное взаимодействие входящих в него подсистем [10]. Применительно к ИЭ, аппаратная реализация единого информационного пространства включает: локальные ИДС; ЭВМ уровней АСУ ТП и АСУП; локальные серверы баз данных; коммутаторы, концентраторы, маршрутизаторы; интерфейсные устройства (сетевые карты, беспроводные точки доступа); Internet-модемы, Firewalls, VPN-серверы; среду передачи данных (сетевые кабели, антенны и т.д.).

6. Информационно-диагностические системы

Важной функцией современного автоматизированного оборудования горных машин является мониторинг их состояния. Мониторинг — это систематические наблюдения за техническим объектом в процессе его эксплуатации, оценка состояния его компонентов и прогнозирование поведения в реальном масштабе времени.

Цель мониторинга — получение объективной информации о работе машины в течение смены с целью принятия управленческих решений на различных уровнях иерархии. Результаты мониторинга технического объекта позволяют существенно повысить эффективность эксплуатации оборудования, в первую очередь за счет повышения его надежности в конкретных

горно-геологических условиях, коэффициента технического использования, своевременного выполнения профилактических мероприятий, экономии энергозатрат.

Задачи мониторинга принято разделять на две группы:

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

- определение показателей, характеризующих состояние машины в течение всей рабочей смены, а также режимы ее работы — нагрузки на узлы, скорость передвижения, время рабочего цикла и т.д.

Горные машины с точки зрения системы сбора и передачи информации характеризуются рядом особенностей:

- объект является полностью автономным, поэтому построение системы мониторинга затруднено из-за организации связи, которая во многих случаях просто невозможна;

- перемещение машин в течение смены, затрудняющее прогнозирование местоположения и организацию связи;

- тяжелые условия эксплуатации машин (вибрации, удары, перепады температур, запыленность и др.);

- ограниченные возможности установки датчиков и другой измерительной аппаратуры.

Разрабатываемые ИДС — развивающиеся системы, включающие группу взаимосвязанных компонентов: подсистему контроля приводов главного движения и работы механизмов; подсистему диагностики состояния оборудования; подсистему учета энергопотребления и производительности экскаватора; подсистему контроля аварийных событий; подсистему оперативного управления; подсистему связи.

ИДС горной машины реализуется на основе: стандартных технических средств автоматизации; типового и специализированного программного обеспечения; электрооборудования, входящего в состав типового низковольтного комплектного устройства.

Оборудование ИДС включает: сенсорный монитор оператора; главный компьютер; блок бесперебойного питания; комплект датчиков параметров технологического процесса; концентраторы данных; локальную компьютерную сеть; модемы.

Заключение

1. Переход к технике управления нового поколения для горных машин характеризуется функциональным и конструктивным объединением электромеханических преобразователей с энергетическими и информационными компонентами с высоким уровнем организации процессов управления. Такие машины приобретают свойства роботов или подвижных горных машин с гибкопрограммируемыми средствами автоматизации, обеспечивающими выбор эффективного решения в изменяющейся обстановке.

2. Создание мехатронных комплексов горных машин нового поколения с качественно новыми характеристиками на основе синергетического объединения различных подсистем с компьютерным управлением возможно только при высоком уровне конструктивной, информационной и электромагнитной совместимости механических, электронных и информационно-управляющих элементов. Это обуславливает актуальность задачи совершенствования всех технических средств мехатронного комплекса для обеспечения их эффективного взаимодействия.

3. Разработка новых методов моделирования и проектирования для практики горного машиностроения позволит получить оптимальные параметры мехатронной системы и ее компонентов с точки зрения максимальной энергоэффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малафеев С.И., Серебренников Н.А. Создание электрооборудования и систем управления для экскаваторов на основе мехатронной технологии // Горное оборудование и электромеханика. 2007. № 12. — С. 29–34.
2. Малафеев С.И., Малафеева А.А. Теория автоматического управления. — М. Академия. 2014. — 380 с.
3. Малафеев С.И., Малафеева А.А. Человек и автоматика: конкуренция или взаимодействие? / Автоматизация в промышленности. — 2014. — № 12. — С. 8–10.
4. Power Electronics Handbook / Ed. M.H. Rashid. — Academic Press. 2007. — 1153 p.
5. Тангаев И.А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. — М.: Недра, 1986. — 231 с.
6. Малафеев С.И., Захаров А.В. Исследование потерь в асинхронном двигателе при переходных процессах / Электротехника. — 2008. — № 7. — С. 2–5.

7. Малафеев С.И., Анучин А.В., Серебренников Н.А. Экскаватор ЭШ-11/75: Новая система управления приводами / Горное оборудование и электромеханика. — 2013. — № 2. — С. 14–18.

8. Малафеев С.И., Серебренников Н.А., Карклин А.В. Мехатронные комплексы станков шарошечного бурения / Проектирование и технология электронных средств. — 2005. — № 3. — С. 67–72.

9. Малафеев С.И., Афанасьев П.М., Студеникин В.А. Автоматизированная система управления земснарядом / Автоматизация в промышленности. — 2012. — № 8. — С. 57–59.

10. Малафеев С.И., Тихонов Ю.В. Компоненты интеллектуального управления для карьерных экскаваторов // Автоматизация в промышленности. — 2013. — № 10. — С. 33–37.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Малафеев Сергей Иванович — д-р техн. наук, профессор Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, главный научный сотрудник ООО Компания «Объединенная Энергия», Владимир, e-mail: sim_vl@nm.ru

Новгородов Андрей Александрович — руководитель отдела проектирования мехатронных систем ООО Компания «Объединенная Энергия», Владимир, e-mail: simon@jpc.ru



UDC 621.31

ELECTRIC EQUIPMENT AND CONTROL SYSTEMS FOR MINING MACHINES NEW GENERATION: SOLUTIONS COMPANY «JOINT POWER»

Malafeev Sergey I., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Vladimir State University, Principal Researcher, Joint Power Co., Vladimir, e-mail: sim_vl@nm.ru

Novgorodov Andrei A., Head of Mechatronic System Design Department, Joint Power Co., Vladimir, e-mail: simon@jpc.ru

The directions of improvement of technical equipment and control systems for mining machines on the basis of functional and structural unification of electromechanical converters with energy and information components with a high level of organization of management processes. Results of design experience in industrial production and operation of mechatronic systems for single bucket mining excavators, drilling rigs and dredgers.

Key words: mechatronics, excavator, drilling rig, dredge, IGBT-transistor, power control system.

REFERENCES

1. Malafeev S.I., *Mining Equipment and Electrical Engineering*, 2007, no. 12, pp. 29–34.
2. Malafeev S.I., Malafeeva A.A. 2014, *Theory of Automated Control*, Akademia, Moscow, 380 p.
3. Malafeev S.I., Malafeeva A.A. *Automation in Industry*, 2014, no. 12, pp. 8–10.
4. Rashid M.H. *Power Electronics Handbook*, Moscow, Academic Press, 2007, 1153 p.
5. Tangaev I.A. *Energy Content of Mineral Mining and Processing*, Moscow, Nedra, 1986, 231 p.
6. Malafeev S.I., Zakharov A.V. *Electrical Engineering*, 2008, no. 7, pp. 2–5.
7. Malafeev S.I., Anuchin A.V., Serebrennikov N.A. *Mining Equipment and Electrical Engineering*, 2013, no. 2, pp. 14–18.
8. Malafeev S.I., Serebrennikov N.A., Karklin A.V. *Design and Technology of Electrical Devices*, 2005, no. 3, pp. 67–72.
9. Malafeev S.I., Afanas'ev P.M., Studenikin V.A. *Automation in Industry*, 2012, no. 8, pp. 57–59.
10. Malafeev S.I., Tikhonov Yu.V. *Automation in Industry*, 2013, no. 10, pp. 33–37.