

## ЭРГАТИЧЕСКАЯ МЕХАТРОННАЯ СИСТЕМА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА: НОВЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР

С.И. Малафеев, А.А. Малафеева (ВлГУ им. А. Г. и Н. Г. Столетовых)

*Представлен анализ современных подходов к автоматизации карьерных экскаваторов с учетом требований эргономики. Показана возрастающая роль человеческого фактора при автоматизации горных машин. Рассмотрены особенности проявления человеческого фактора в условиях качественного обновления средств управления: информатизации, применения новых средств контроля, управления и телекоммуникаций. Выполнен анализ основных функций оператора, рассмотрены особенности проектирования средств управления с учетом проявлений человеческого фактора. Приведены примеры новых технических решений, обеспечивающих повышение эффективности эргатической мехатронной системы экскаватора.*

*Ключевые слова:* эргономика, экскаватор, мехатроника, автоматизация, электропривод, управление, человеческий фактор.

### Введение

Масштабные ориентиры долгосрочной программы развития угольной промышленности России, предусматривающие рост производительности труда и повышение основных показателей уровня промышленной и экологической безопасности, могут быть достигнуты только за счет инновационных технологических решений по технической модернизации производства. Основой этого процесса в настоящее время является автоматизация технологических процессов и роботизация горной техники. Новая технология организации в горной отрасли промышленности «Интеллектуальный карьер» предлагает уменьшение и по возможности исключение присутствия людей в горных разработках, охрану здоровья персонала и повышение качества работы [1]. Особое значение новой технологии для отечественной промышленности обусловлено тем, что в России добыча полезных ископаемых в основном ведется в очень сложных климатических условиях в труднодоступных регионах: Восточной Сибири, Якутии, Крайнем севере. Это повышает затраты и затрудняет работу персонала предприятий. В тяжелых условиях эксплуатации все компоненты горных машин подвергаются интенсивным внешним воздействиям, вследствие чего происходит их ускоренное изнашивание. Простой машины при отказе компонентов сопровождается большим экономическим ущербом, связанным, главным образом, с невыпуском продукции. На ремонт и техническое обслуживание экскаваторов в настоящее время приходится до 30% затрат на добычу полезных ископаемых; более 20% — на простои, связанные с ремонтами, около 40% — на непроизводительную малоэффективную работу.

Карьерный экскаватор — самая сложная мехатронная система в промышленности, работающая в большинстве случаев в экстремальных условиях. Поэтому в настоящее время сохраняется автоматизированное управление погрузкой. При этом быстрыми темпами происходит качественное обновление технических средств управления экскаваторами, в том числе основанных на использовании интеллектуальных компонентов, направленное главным образом



Рис. 1. Рабочее место машиниста экскаватора

на повышение производительности [2, 3]. Вместе с тем психофизиологические возможности человека практически не изменяются. Недостаточный учет человеческого фактора приводит к снижению производительности машин, заложенных при проектировании [4].

В настоящей работе рассмотрены результаты разработки новых систем управления для карьерных экскаваторов, в том числе выполненные в Компании «Объединенная Энергия» с учетом критерия гармоничного взаимодействия технических средств и операторов.

### Функции машиниста экскаватора

Новая техника в горной промышленности привела к расширению возможностей и характера работы машиниста экскаватора, главным образом, в отношении информационных и когнитивных функций [5, 6]. В условиях сложных и интенсивных горных работ оператор выполняет следующие основные функции:

- 1) следящее управление рабочим органом — ковшем экскаватора. Оператор при этом является звеном следящей системы;
- 2) управление технологическим процессом погрузки: наполнением ковша и загрузкой автосамосвала. Визуальный контроль параметров технологического

процесса: забоя, загрузки самосвала, положения экскаватора и др., учет отгруженной горной массы;

3) контроль состояния оборудования, включая рабочие органы, электрооборудование, систему электропитания и др.;

4) обнаружение неисправностей оборудования, аварийных состояний, противоаварийное управление. Определение причин аварий и восстановление работоспособного состояния машины;

5) взаимодействие с другими участниками технологического процесса.

В процессе работы оператору приходится постоянно контролировать визуально технологический процесс, средства отображения информации и данные информационно-диагностической системы (ИДС). Эффективная работа экскаватора обеспечивается при выполнении трех условий: надежная совершенная техника, высококвалифицированный персонал и гармоничное взаимодействие человека и машины. При этом взаимодействие человека и машины во многих случаях имеет решающее значение: адаптация оператора к технике может быть как положительной, так и отрицательной, а ошибки в распределении функций автоматики и ручного управления способны привести к серьезным авариям [7].

#### Совершенствование взаимодействия оператора и новой техники

Сформулируем основные направления совершенствования взаимодействия оператора и техники при проектировании средств управления для экскаваторов нового поколения

*Организация рабочего места оператора в соответствии с требованиями эргономики.* Традиционная задача успешно решается в современных экскаваторах путем использования кабины с защитой от шума и широким обзором, виброзащищенного кресла, рационального расположения удобных органов управления, системы освещения забоя и др. (рис. 1). Большое значение имеет совершенствование рычагов управления, совпадающих с естественными изгибами руки оператора и уменьшающих нагрузки на запястье и др.

*Совершенствование электроприводов главного движения* путем оптимальной коррекции статических характеристик и согласования динамических свойств приводов и оператора. Три взаимосвязанных электропривода экскаватора: подъема, напора (тяги) и поворота реализуются по принципу подчиненного регулирования координат и обеспечивают работу в четырех квадрантах механической характеристики при реактивных и активных нагрузках. Приводы имеют общую структуру: внутренний подчиненный контур тока и второй контур скорости. Оператор задает скорость привода с помощью командоаппарата и выполняет функцию регулятора положения в третьем главном контуре регулирования. Характеристики операторов изменяются случайным образом. Это означает, что в зависимости от особенностей маши-

*Решением всякой проблемы служит новая проблема.*

И.В. Гете

ниста варьируются «параметры» регулятора третьего контура и изменяются статические, динамические и энергетические свойства не только конкретного привода, но всей мехатронной системы в целом. Уменьшение чувствительности достигается согласованием характеристик всех звеньев мехатронной системы и осуществляется из условия обеспечения заданных характеристик при эффективном использовании физических возможностей ее компонентов. Для этого применяется управление ограничениями, интенсивностью задающих воздействий, коррекция работы при неидеальных характеристиках механических передач, например, при выборе зазоров, демпфирование упругих колебаний, координирующее управление, нелинейные обратные связи, адаптация к параметрам питающей электрической сети и др. Основное требование к алгоритмам управления взаимосвязанными приводами в эргатической мехатронной системе — обеспечение устойчивости и качества регулирования при проявлении взаимных связей между переменными состояния [8].

*Коррекция управляющих воздействий с целью исключения ошибочных действий оператора.* Множество возможных управляющих действий оператора ограничено логической системой разрешений, исключающих недопустимые ситуации. Важной функцией автоматической системы управления является ограничение движений ковша в пространстве с целью защиты стрелы от ударов ковшом и рукоятью, ограничения боковых нагрузок при черпании, защиты от переподъемов стрелы. Формирование сигналов защиты осуществляется на основе моделирования положения ковша относительно линий запрещенных зон на основе измерения длины подъемного каната и хода рукояти для мехлопаты или длин тягового и подъемного канатов для драглайна. Для измерения длин канатов используются многооборотные цифровые абсолютные датчики положения.

В рамках проекта создания автономного экскаватора группой компаний в Австралии (Smart Machines в университете Квинсленда, Австралийским центром полевой робототехники в университете Сиднея, при поддержке CRCMining, CSIRO и Joy Global Surface Mining Equipment), были определены и разработаны пять локальных технологий для автоматизации управления процессом погрузки: TrackShield — технология поддержки оператора, обеспечивающая безопасность путем защиты от столкновений между экскаватором и автосамосвалом; DozerShield — технология помощи оператору в обеспечении надежного уровня защиты от столкновений экскаватора и бульдозера для очистки забоя; AutoSwing — вспомогательная технология, обеспечивающая полуавтоматический режим копа-

ния, которая позволяет выполнять фазы поворота, разгрузки и возврата ковша в начальное положение; AutoFill — вспомогательная технология, обеспечивающая высокий уровень автоматизации, который позволяет автономно выполнять фазы копания, поворота, разгрузки и возврата в цикле экскаватора [9]. В системах используются измерения положения самосвала относительно экскаватора с помощью GPS навигаторов, ультраширокополосных (UWB) дальнометров и 3D сканирующий лидар.

*Расширение возможностей наблюдения за технологическим процессом и рабочим оборудованием.* Для наблюдения за всеми важными зонами действия экскаватора и оборудованием нижней кабины традиционно используются специальным образом размещенные высокопрочные видеокамеры. Компания Motion Metrics предлагает системы обнаружения приближающихся объектов, контроля потери зубьев ковша, мониторинга износа коронок зубьев, авто-

матического анализа фрагментации породы в ковше, мониторинга погрузки и др. Системы видеонаблюдения используют интеллектуальные алгоритмы обработки видеозображений.

*Полный контроль состояния оборудования и систем экскаватора.* ИДС в настоящее время являются неотъемлемым компонентом системы управления экскаватора и обеспечивают информационную поддержку оператора. Задачи ИДС принято разделять на две группы [10]:

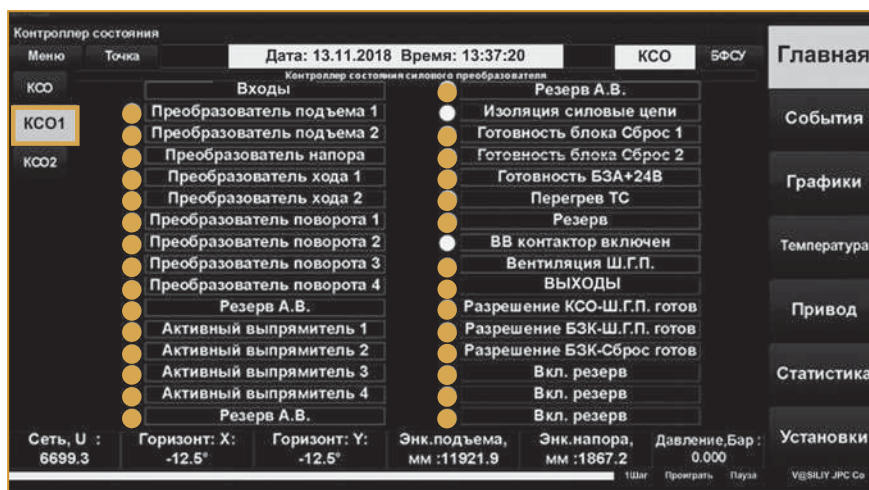
— определение количественных показателей, характеризующих объемы выполненной машиной работы, динамику их изменения в течение смены, расход энергии за этот период с определенной дискретностью во времени и др.;

— 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.

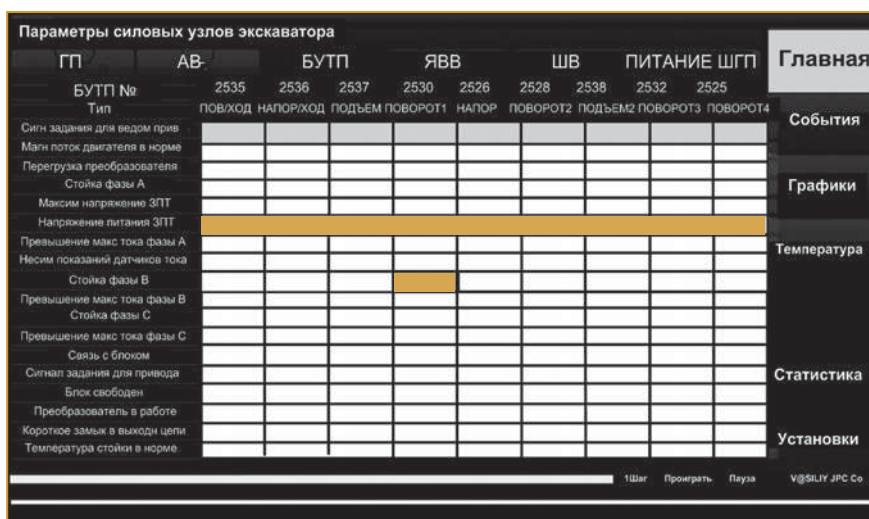
ИДС — развивающаяся система, включающая группу взаимосвязанных компонентов: контроля приводов главного движения и работы механизмов, диагностики состояния оборудования, учета энергопотребления и производительности экскаватора, контроля аварийных событий, оперативного управления, связи. В основе технологии компании P&H (подразделение Joy Global Inc.) лежит система управления и сбора данных Centurion. Аппаратные и программные компоненты этой системы специально разработаны для создания высокоэффективной и тесно увязанной сети контроля, управления и передачи данных. ИДС «Пульсар-7», разработанная Компанией «Объединенная Энергия», используется на отечественных экскаваторах.

Основным компонентом взаимодействия персонала и системы является дружелюбный и удобный в навигации графический интерфейс пользователя. С помощью сенсорного экрана, сочетающего одновременно аппаратную и программную части, происходит управление системами экскаватора.

Обслуживающий персонал имеет возможность отслеживать следующие показатели: угол наклона экскаватора; состояние всех компонентов; температуру электрических машин, подшипников, преобразователей, воздуха в кабине



а)



б)

Рис. 2. Экраны диагностики компонентов системы: а) состояние преобразователей (причина аварии выделена белым – сработала защита от токов утечки в силовых цепях); б) элементы приводов (причина аварии выделена цветом – сработала защита драйвера в фазе В блока № 2530 привода поворота)

и за бортом, масла; параметры подводимой электроэнергии, состояние изоляции электрооборудования, данные о производительности экскаватора; информацию о неисправностях на экскаваторе и др.

В ИДС обрабатываются и хранятся оперативные данные и история работы экскаватора. ИДС оперирует с большим объемом данных, предоставление которых оператору не только не требуется, но может нарушить его нормальную работу. Поэтому основное направление развития ИДС — это интеллектуальная обработка данных с целью освобождения оператора от сложных процедур контроля и предоставления актуальной информации в удобной форме на основе установленных приоритетов [2]. Функция интеллектуальной диагностики имеет особое значение при обнаружении неисправностей оборудования. На рис. 2 показаны примеры экранов монитора ИДС «Пульсар-7» [10], отображающие причины аварийных отключений, идентифицированных интеллектуальной системой диагностики.

*Алгоритмы противоаварийного управления.* Обычно считается, что автоматика работает более эффективно, надежно и точно, чем человек-оператор. Однако оператор незаменим при нештатных событиях в работе, во время технического обслуживания, ремонтов и настройки экскаваторов. При проектировании средств автоматического управления практически невозможно предвидеть все ненормальные ситуации в сложной среде, более того известно, что каждая авария развивается по собственному сценарию, а поведение операторов во время аварий имеет субъективный характер. Многочисленные примеры свидетельствуют об авариях в результате несогласованного действия автоматики и операторов, например, во время работы при отключенных или неисправных системах защиты. Обеспечение высокой безопасности горных работ требует приоритетного внедрения интеллектуальных систем противоаварийного управления в человеко-машинной системе и средств взаимодействия автоматики и оператора.

*Взаимодействие операторов с другими участниками технологического процесса.* Телекоммуникационная система, разработанная Компанией «Объединенная Энергия», обеспечивает возможность удаленного наблюдения и управления через сеть Internet с любого персонального компьютера или мобильного устройства (телефона, планшетного компьютера) при помощи программы удаленного администрирования, установленной на компьютере-мониторе ИДС. Программа позволяет наблюдать процессы и управлять экранами системы, а также имеет возможность пересылки файлов-архивов на компьютер или мобильное устройство удаленного пользователя. Предусмотрена дистанционная настройка приводов, активных выпрямителей и другого оборудования. Оператор, таким образом, получает возможность оперативного взаимодействия со всеми службами предприятия, а также разработчиком системы управления.

Данные, поступающие из ИДС и преобразованные по специальным алгоритмам, выводятся на монитор и сохраняются на сервере. Важная для оценки работы информация запоминается в программных модулях и обрабатывается с целью анализа эффективности работы экскаватора, оценивания его надежности. В процессе работы производится регистрация основных процессов, изменения состояния оборудования, протоколов аварий и др. Данные хранятся на сервере и передаются в центр. Срок хранения записей зависит от вида процесса и типа оборудования. Данные, получаемые с машины, используются разработчиком оборудования для уточнения моделей при проектировании новых машин и коррекции параметров машин, находящихся в эксплуатации.

Современные технические средства измерений и обработки данных позволяют организовать обратную связь от эксплуатации к проектированию, при этом сбор данных осуществляется средствами ИДС промышленных автоматизированных объектов, после чего производится передача данных ИДС на предприятие — изготовитель и их автоматизированный анализ. При этом реализуется технология получения проектных данных непосредственно с действующего объекта [2, 10].

*Оценивание эффективности и качества работы оператора и управление его квалификацией с помощью обратной связи по объективным показателям.* По данным ИДС за выбранный период работы, например, смену, формируется отчет [10]. Документ доступен всем участникам эксплуатации машины, в том числе разработчикам НКУ и изготовителям экскаватора. Анализ отчета позволяет обоснованно планировать работу и выявлять ошибки в организации горных работ.

*Электронный машинист* — специальная программно-аппаратная система постоянного контроля работы экскаватора и его отдельных компонентов и формирования объективных данных обо всех системах экскаватора, включая самого машиниста, окружающей среде, системе электропитания [2, 10]. «Электронный машинист» — это аналитический наблюдатель за работой экскаватора и его подсистем в течение всего жизненного цикла. Программно-аппаратный комплекс «Электронный машинист» выполняет обработку сигналов из информационно-диагностической системы и анализ процессов, состояния оборудования и действий машиниста, на основе анализа формирует объективные данные о работе машины, отражающие историю, состояние и прогноз ресурса компонентов [10].

### Заключение

Движение к стратегической цели автоматизации в горной отрасли — созданию полностью роботизированных добывающих предприятий, реализующих технологические процессы без участия людей, происходит в настоящее время путем постепенных усовершенствований отдельных компонентов машин. Широкий спектр инноваций в технике управления экскаваторами изменяет положение человека в авто-

матерIALIZED комплекс. При этом задачи эргономики смещаются от традиционных задач рациональной организации рабочего места к проектированию интерфейсов человека и машины в условиях единого информационного пространства. Важнейшим условием эффективного внедрения новой техники является обеспечение гармоничного взаимодействия человека и машины. Этот критерий должен быть доминирующим при проектировании новых систем управления.

#### Список литературы

1. *Владимиров Д.Я.* Интеллектуальный карьер: Эволюция или революция? // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск. Открытые горные работы в XXI веке. 2015. № 45-1. С. 77 - 82.
2. *Malafeev S.I., Malafeev S.S., Tikhonov Y.V.* Intelligent diagnostics of mechatronic system components of career excavators in operation // Advances in Neural – Computation, Machine Learning and Cognitive Research. NEUROINFORMATICS 2017. Studies in Computational Intelligence, vol. 736. Springer International Publishing AG 2018. Pp. 110 -116. Doi:10.1007/978-3-319-66604-4\_17.
3. *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. Vol. 117. 2016. pp. 89 - 97; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.035>.
4. *Вайнштейн Л.А.* Научное обеспечение человеческого фактора в различных технологических укладах // Наука и инновации. 2014. № 7(137). С. 8-12.
5. *Lynas D., Horberry T.* Human factors issues with automated mining equipment // Ergonomics Open Journal. 2011. № 4. pp. 74 - 80.
6. *Малафеев С.И., Малафеева А.А.* Человек и автоматика: конкуренция или взаимодействие? // Автоматизация в промышленности. 2014. № 12. С. 8 - 10.
7. *Horberry T., Larsson T., Johnson I., Lambert J.* Forklift safety, traffic engineering and intelligent transport systems: A case study. Appl Ergon 2004; 35(6). Pp. 575 - 581.
8. *Малафеева А.А.* Геометрическая модель внешних управлений в сложных системах // Известия РАН. Теория и системы управления. 2010. № 4. С. 18 - 26.
9. *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.
10. *Малафеев С.И., Конышин В.И.* Организация мониторинга карьерных экскаваторов // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. Новокузнецк. 2017. №3. С. 201 - 206.

*Малафеев Сергей Иванович – д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник ООО Компания «Объединенная Энергия», проф. Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Малафеева Алевтина Анатольевна – д-р техн. наук, проф. Владимирского государственного университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. Контактный телефон (495) 558-88-18. E-mail: simalafeev@gmail.com*

#### ABB и Ericsson прокладывают путь для цифровой трансформации промышленности

Компании ABB и Ericsson совместно с оператором связи Swisscom (Швейцария) впервые представили, как с помощью технологий сетей мобильной связи 5G можно легко и эффективно управлять роботами на большом расстоянии в режиме реального времени.

В рамках Всемирного экономического форума 2020 г. в Конгресс-центре Давоса (Швейцария) коллаборативный робот YuMi, созданный ABB, написал сообщение, которое одновременно воспроизвел второй робот YuMi на расстоянии 1,5 км от этого места.

Синхронность этих действий была достигнута благодаря сети 5G компании Swisscom на базе телекоммуникационной технологии Ericsson. За роботами можно было наблюдать в реальном времени на видеозэкранах, установленных на обеих площадках. Фундаментальные технологии, необходимые для подключения промышленного оборудования к 5G-сетям, были созданы в результате многолетнего научно-технического сотрудничества ABB и Ericsson.

Эта демонстрация показывает лишь малую часть огромных возможностей, которые открываются в промышленности и робототехнике с приходом сетей но-

вейшего поколения. Технологии беспроводной связи 5G упрощают подключение роботов к облачным платформам и автоматизированным системам управления производством. В результате можно быстрее передавать большие объемы данных, получать ценную аналитику и оптимизировать на ее основе процесс принятия решений. Такие улучшения способствуют повышению эффективности и надежности всего технологического цикла. Замена традиционной проводной инфраструктуры мобильными 5G-сетями даст возможность значительно улучшить гибкость производства. Благодаря сетям 5G станут возможны развертывание и слаженная работа больших парков автономных машин и роботов.

Одно из главных преимуществ промышленной инфраструктуры на основе 5G заключается в том, что она позволяет отказаться от концепции "одно управляющее устройство - одна функция". Вместо этого управление множеством машин можно будет осуществлять из единого центра. В результате сократятся затраты на администрирование и техническое обслуживание операционных и информационных систем в мировом масштабе.

[Http://www.abb.ru](http://www.abb.ru)