



ОБЗОР СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ШАГАЮЩИХ ЭКСКАВАТОРОВ ДРАГЛАЙНОВ

Н.В. Осипова (Московский институт стали и сплавов)

Представлен обзор известных систем автоматического контроля производительности экскаваторов драглайнов на карьерах. Сформулированы существующие проблемы при ведении технологического процесса экскавации. Рассмотрены аналитический и практический способы контроля. Приведено описание известных фирменных решений, прошедших промышленные испытания, а также теоретических разработок. Показаны достоинства и недостатки методов измерения объема вскрышных работ. Определено дальнейшее направление исследований по созданию и совершенствованию систем автоматического контроля производительности драглайнов.

Ключевые слова: драглайн, выемка, забой, лазерный сканер, 3D-модель, мониторинг, GPS, CAD-формат.

Введение

Экскаватор драглайн является одним из распространенных типов оборудования для проведения выемочно-погрузочных работ. Применяется в процессах открытой добычи для удаления вскрыши так называемой «пустой породы», которая покрывает залежи полезных ископаемых. Промышленностью выпускаются драглайны на шагающем и гусеничном ходу. Конструктивно драглайн имеет решетчатую стрелу, тяговый и подъемный канаты, к которым на цепях подвешен ковш [1, 2]. Алгоритм работы экскаватора включает следующие операции:

- черпание: опускание ковша на грунт, включение тягового барабана, заглубление в землю, перемещение под действием собственного веса и тягового каната, наполнение ковша;
- подъем: включение подъемного барабана, отрыв ковша от земли;
- поворот: включение электропривода поворота и движение с груженым ковшом;
- разгрузка: ослабление тягового троса, опрокидывание ковша под действием собственного веса;
- поворот обратно к забою.

Главная трудность, с которой сталкивается машинист, заключается в необходимости выбора оптимального пути движения ковша для загрузки «с шапкой» с учетом группы, плотности, влажности грунта и предельной толщины его отрезаемой стружки. Последняя зависит от мощности экскаватора и от возможностей его двигателя. Например, срез слишком тонкой стружки увеличивает время копания, что отразится на производительности. Также следует выбирать оптимальную глубину копания, так как иногда для полного заполнения или даже переполнения ковша проходит путь намного меньший, чем позволяет глубина забоя. Движение в оставшейся части пути без загрузки вызывает потери энергии и времени.

Производительность экскаваторов характеризуется величиной полезной работы по выемке (вскрыше) и перемещению грунта, выполненной в единицу времени. Основными факторами, оказывающими влияние на производительность, являются особенности конструкции машины, характер грунта, условия забоя, организация работ, квалификация машиниста.

Результаты ранее проведенных исследований [3] показали, что фактическая производительность драглайна ЭШ 10/70 на разрезе «Кангаласский» резко отличается в разные месяцы работы (рис. 1). Это связано не только с погрешностью ее измерения, но и с колебаниями физико-механических свойств разрабатываемого грунта в различные периоды года из-за наличия дождей весной/осенью или сильной летней засухи. Такая нестабильность погодных условий изменяет сопротивляемость копанию и время заполнения ковша. Основная проблема машиниста заключается в невозможности оперативно отслеживать объем выполняемой работы, чтобы своевременно предпринять действия для его корректировки в сторону плановых показателей. Поэтому задача разработки бортовых информационно-измерительных систем on-line мо-

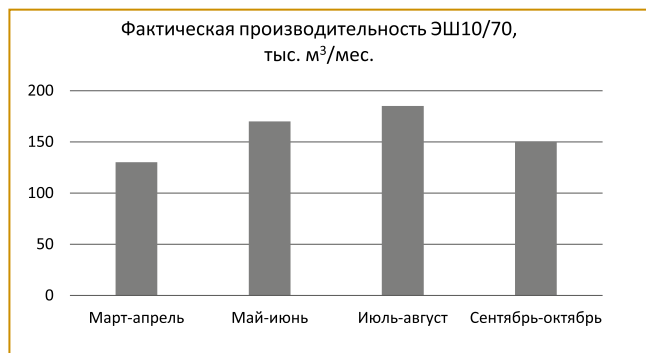


Рис. 1. Фактическая производительность драглайна ЭШ 10/70 в разные периоды года

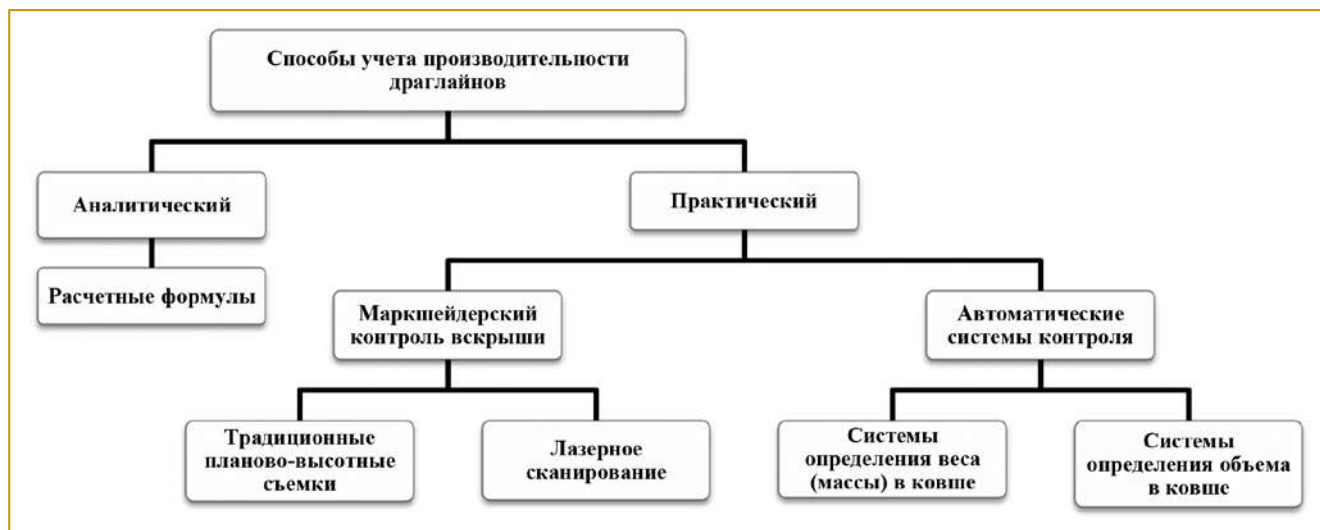


Рис. 2. Способы учета производительности экскаваторов драглайнов

нитинга производительности экскаватора драглайна является актуальной.

На рис. 2 приведены известные способы учета производительности экскаваторов драглайнов. На сегодняшний день производительность драглайнов можно оценить аналитически или практически.

Аналитический способ учета производительности экскаваторов драглайнов

При всех аналитических исследованиях теоретическая производительность определяется полуэмпирическим методом расчета как отношение вместимости ковша ко времени одного рабочего цикла [2].

Для расчета технической производительности аналитическая производительность умножается на коэффициент наполнения ковша и длительность непрерывной работы экскаватора в одном месте установки, а результат делится на коэффициент разрыхления породы, умноженный на сумму выше приведенной длительности и длительности одной передвижки экскаватора

Эксплуатационная производительность определяется умножением технической производительности на коэффициент использования экскаватора во времени.

Достоинством этого метода расчета производительности экскаватора является простота и универсальность применения. В тоже время для него характерен ряд недостатков. Покажем некоторые из них.

Так, значительная неточность получаемого результата, которая иногда достигает до 30%, наблюдается из-за того, что в формулах значение вместимости и коэффициентов задаются постоянными величинами. На практике это не выполняется. Например, из-за налипания и примерзания грунта ко дну и стенкам ковша меняется его вместимость. Время цикла экскавации также колеблется в широких пределах. Коэффициенты наполнения и разрыхления имеют различные диапазоны

изменений. Может получиться так, что в одном случае при коэффициенте наполнения 0,8, что соответствует частичному заполнению ковша горной массой из-за неудачного проведения технологической операции «черпания», коэффициент разрыхления будет равен 1,1. Производительность будет оценена так же, как и при коэффициенте наполнения, равном 1,1 (переполненный ковш) и коэффициенте разрыхления, равном 1,5.

Частичный учет статистического характера коэффициентов, представленных в виде уравнений регрессии, не приводит к верным расчетам, так как при этом берется во внимание только состояние горной массы, но не учитываются изменения погодных условий (температура, влажность и др.) [4].

Другой аналитический способ позволяет найти объем вскрышных работ как сумму объемов горной массы в ковше драглайна в каждом цикле экскавации, выраженных через произведение длины и ширины ковша, коэффициента пути наполнения, разрыхления и толщины снимаемой стружки. Однако вследствие постоянных колебаний стрелы во время черпания последняя величина непостоянна, поэтому расчетные формулы не дают верный результат.

Маркшейдерский контроль

При практическом способе используется маркшейдерский контроль вскрыши в целях обеспечения достоверного учета. Он включает периодический подсчет ее объемов и сравнение полученных данных с отчетными.

В классической маркшейдерии для этих целей используются данные плано-высотной съемки выемок в масштабе 1:2000, полученные тахеометром или фототеодолитом.

Объемы выемок определяются в основном способами среднего арифметического, горизонтальных и вертикальных сечений, объемной палетки¹. Первые

¹ Инструкция по маркшейдерскому учету объемов горных работ при добыче полезных ископаемых открытым способом (РД 07-604-03). Серия 07. Выпуск 13/ Колл. авт. – М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004.

два используют для нахождения объема полусумму площадей сечений по верхним и нижним бровкам, умноженную на среднюю высоту заходки.

В способе вертикальных сечений выемку разбивают на элементарные объемы, образованными границами заходок, находят полусумму площадей сечений на границах вынудой заходки, умноженную на расстояния между сечениями. И так продолжается для каждого элементарного объема, которые затем складываются.

Третий способ основан на вычислении произведений площади прямоугольника палетки и суммы высот вынудого слоя в вершинах палетки, попадающих внутрь контура и на контур выемки за вычетом той же суммы высот, не попадающих на контур выемки или расположенных от него на расстоянии менее половины стороны прямоугольника палетки.

Применение маркшейдерских методов связано с необходимостью большого числа съемочных точек для повышения точности измерения объема горных работ и высокой оперативности выполнения съемок в условиях быстро изменяющейся ситуации на карьерах. Следовательно, традиционные маркшейдерские методы не всегда эффективны, достаточно трудоемки и не обладают оперативностью.

Появление технологии съемок выемок с использованием технологии лазерного сканирования и последующей обработки данных создало маркшейдерам новые возможности для определения объемов работ. При этом качество результата достигается за счет высокой плотности, точности получения пространственных координат поверхности и меньшей погрешности. Время съемочных работ сокращается примерно в 10 раз [5]. Принцип сканирования основан на измерении времени прохождения лазерного луча двойного расстояния от излучателя до поверхности и обратно. Накопленный массив точек экспортируется в CAD-формат. Обработка этих данных включает посадку, трансформацию сканов и создание поверхностей. Известные решения в области лазерных сканирующих систем представлены фирмами Reigl, Leica, Topcon.

Части массивов точек получают с разных мест расположения лазерных сканеров. Для их объединения используются привязки к маркам-отражателям. Распознавание данных отражающих элементов происходит автоматически или вручную. При этом координаты отражателей могут быть измерены при помощи тахеометра или GPS.

Из-за того, что лазерный сканер привязан к собственной системе координат, начало которой обычно расположено в центре приемо-передающей части, полученные исходные данные необходимо трансформировать в систему координат, используемую на горном объекте. В современных лазерных сканирующих

системах этот процесс полностью автоматизирован.

Для объединения «облака» точек в поверхности используются триангуляционные сетки для удобства экспорта в любые CAD-форматы и 3D-приложения. Также можно совместить сканированное изображение и это же фотоизображение для придания реальных цветов и текстуры.

Несмотря на большую популярность и дальнейшее развитие лазерных сканирующих технологий, маркшейдерские средства остаются несовершенными. Это объясняется рядом причин. Во-первых, невозможно проводить измерения в условиях заснеженного земляного полотна и при низких температурах воздуха, тумана, дождя, снегопада, запыленности атмосферы, а также обеспечить безопасность при съемке труднодоступных и опасных объектов. Во-вторых, лазером не всегда удается получить трехмерную модель объекта с одной точки. Требуется немало времени на установку GPS и марок-отражателей и на дальнейшую обработку изображений. В-третьих, маркшейдерский метод не оперативен, так как контрольный подсчет объемов по карьере выполняется всего один раз в месяц. За это время грунт сильно проседает вследствие дождей или засыпается снегом, что искажает первоначальную форму экскаваторной проходки.

Системы определения веса (массы) в ковше

Помимо вышеперечисленных способов, в начале 70-х годов XX столетия начали активно разрабатываться различные системы оперативного контроля загрузки ковша экскаватора драглайна. В частности, в 1972 г. сотрудниками НИИ «Гипроуглеавтоматизация» была спроектирована система для определения веса грунта в ковше². Идея изобретения состоит в измерении силы натяжения подъемного каната при груженом и опорожненном ковше. Разница между этими сигналами пропорциональна весу горной массы «нето» в цикле экскавации.

Позже в 1984 г. данная система была дополнена возможностью учета категории экскавируемости горной массы при расчете веса грунта в ковше, что позволило повысить производительность драглайнов на 3...5%.³

В начале 90-х гг. XX века проблемой определения динамических оценок массы ковша драглайна активно начал заниматься Московский государственный горный университет [6]. Развитием данного исследования стала публикация в начале 2000-х [7]. Основная идея измерения состоит в том, чтобы найти усредненную оценку массы как функцию от текущих значений натяжения канатов и положения ковша в плоскости стреловой конструкции. Величины усилий в канатах на интервале транспортирования определяются через токи якорных цепей силовых модулей соответствующих приводов подъема и тяги. Найденная оценка

² А.И. Филиппенко, Ю.М. Исаев, В.Г. Сорокин. Устройство для контроля работы экскаватора//Описание изобретения к авторскому свидетельству СССР № 327306. – 1972 г.

³ Н.Б. Бирман, В.П. Казбеков, Г.Я. Корсунский, А.С. Перминов, А.И. Филиппенко. Способ оперативного измерения производительности экскаватора драглайна//Описание изобретения к авторскому свидетельству СССР № 1084393. – 1984 г.

содержала составляющие погрешности измерений координаты движения и измерения токов. Для ее уменьшения использовалась статистическая фильтрация на интервале движения на разгрузку или черпания. Усреднение оценок по времени осуществлялось интегрально внутри каждого временного промежутка, на которые разбивался весь интервал измерений.

В современной бортовой информационной системе шагающего драглайна [8] масса породы отображается в базе данных, структурированной по номеру бригады и ФИО машиниста с номером цикла, временными и энергетическими показателями работы.

Во всех выше приведенных исследованиях отсутствует подробная информация о внедрении на горном предприятии и промышленных испытаниях.

Помимо отечественных ученых проблемой автоматизации учета работы драглайнов занимались и за рубежом. Одним из ярких представителей стала американская фирма Thunderbird, проектировавшая приборы контроля производительности по весу вскрыши под названием Tritronics 9000 SERIES 3 Dragline Monitor. Точность измерения составляет 4%. Система также дополнена оповещением о перегрузке стрелы. Сигнал тревоги (визуальное и звуковое сообщение) отправляется оператору. Монитор состояния полностью интегрирован в базу данных по добыче полезных ископаемых.

Несомненно, все эти разработки выигрышны по сравнению с маркшейдерскими методами в плане оперативности, но по точности оставляют желать лучшего. Конечно, возможно выразить объем в ковше через измеряемую массу и плотность грунта, но последняя является величиной непостоянной, так как вскрыша может включать большие камни, пеньки, валуны, корни деревьев и прочие неоднородности.

Системы определения объема в ковше

В области оперативного контроля производительности по объемам горной массы, перемещаемой драглайном в каждом цикле, выделим работу НИИ «Гипроуглеавтоматизация» (1990 г.)⁴. Ее идея заключалась в определении координат нижней кромки зубьев ковша в трехмерной системе через датчики длин тяговых и подъемных канатов, угла поворота платформы, угла наклона плоскости поворотной платформы в плоскости стрелы, угла поворота блока наводки тягового каната, токов в якорных цепях электроприводов подъема и тяги и их сравнение с координатами центра тяжести ковша. Если каждая их них больше либо равна координате нижней кромки ковша, то объем горной массы принимался равным емкости самого ковша, в противном случае — он переворачивался и ничего не набирал. Производительность в цикле определяли как произведение объема вынутой горной массы из забоя на угол поворота платформы драглайна, деленное на длительность цикла экскавации.

⁴ И.Р. Бучин, С.В. Ворончихин, А.С. Перминов, А.И. Филиппенко и В.Г. Шевченко. Способ оперативного измерения производительности экскаватора 1585462. — 1990 г.

В 2007 г. компанией ООО «Мобиль-927» были проведены эксплуатационные испытания системы GPS и GSM-мониторинга на шагающем экскаваторе в Ерковецком разрезе для ООО «Амурский уголь». GPS и GSM-антенна установлены на крышу экскаватора и подключены к мобильному терминалу в кабине машиниста. Мобильный GPS/GSM/GPRS терминал соединен с бортовой сетью экскаватора через блок питания 220 В. Терминал передавал информацию о параметрах работы экскаватора на сервер диспетчера в г. Благовещенск. Получены табличные и графические отчеты производительности шагающего экскаватора. Осуществлен удаленный ее автоматический контроль в режиме реального времени (учет количества раз поднятия ковша с указанием продолжительности по сменам).

Система Digmate, разработанная General Electric, предназначена для непрерывного контроля текущей производительности драглайна и анализа этого показателя. Система мониторинга, установленная на драглайне Marion 8050, позволила усовершенствовать конструкцию ковша драглайна и увеличить производительность экскаватора на 2%. Американская угольная компания Midwestern использует на драглайне с ковшом вместимостью 52,5 м³ компьютерное измерительное устройство, с помощью которого фиксируются объем и время копания в смену, время цикла, простоев, угол поворота, время разгрузки, число шагов и другие параметры. Данные от микропроцессора поступают на дисплей к оператору, который использует их для анализа и оптимизации технологического процесса. В конце каждой смены данные распечатываются или записываются на магнитную ленту, а затем передаются на персональный компьютер для заключительного представления отчета.

Современной разработкой в области автоматического определения производительности драглайнов является система контроля и учета работы экскаватора (СКУРЭ), описанная в [10]. Основой данного проекта служит внедренный ранее аппарат контроля производительности «АКП-1 кат. № 1269.00.000 ИЭ», который представляет собой счетчик числа ковшей, дополненный возможностью контроля отсечек по токам приводов и по времени. Система позволяет учитывать работу не только драглайнов, но и механических лопат. Ее особенностью является учет только полностью выполненных циклов, то есть с заполненным и разгруженным ковшом за требуемое время. Цикл считается не выполненным, если произошло протаскивание ковша без забора грунта (имитация действия) или ковш заполнен не полностью.

Упрощенный алгоритм работы системы следующий. Если ток привода тяги больше заданного значения, то запускается таймер с ожиданием начала подъема; по истечении указанного времени осуществляется проверка условия превышения тока привода подъема заданного значения, если оно выполняется,

то вновь запускается таймер с ожиданием начала поворота; затем проверяется условие превышения ток привода поворота заданного значения, если оно выполняется, то таймер отсчитывает временной интервал, по истечении которого счетчик числа ковшей инкрементируется.

Данная система прошла промышленные испытания на ЭШ-10/70 на разрезе ООО «Ровер». Основу технических средств составляют высоконадежные промышленные контроллеры и панели визуализации, прошедшие сертификацию Ростехнадзора и СЭС.

Система может быть применима на любых моделях российских и зарубежных экскаваторов и легко монтируется без нарушения проложенных заводских схем. Погрешность СКУРЭ не превышает 1% при учете количества ковшей и 5% при учете одного ковша. При часовом учете за счет усреднения результатов она падает до 2%, а при посуточном учете — до 1%.

Недостаток всех вышеперечисленных систем очевиден: объем приравнивается к емкости самого ковша, остаются неучтенными объем налипшего грунта и 20...25% так называемой «шапки».

В начале XX века в научно-исследовательских институтах по автоматизации горных машин Австралии начали активно заниматься разработкой бесконтактных систем контроля производительности горных машин. Наибольшую известность получил проект Джонатана Робертса, Грима Уинстенли, Питера Корка по созданию автоматизированной системы контроля производительности на мощных драглайнах фирмы «Бюсайрус-Эри» [9] с помощью лазерного сканера RIEGL LMS-Q140i. Эксперимент проводился на модели экскаватора масштаба 1:10. Лазерное устройство было расположено на конце стрелы под углом 10° к вертикали таким образом, чтобы его плоскость проходила вдоль нее. Причем тяговые и подъемные канаты, ковш были изъяты в целях предотвращения появления помех в изображении рельефа.

Но такой грандиозный проект не увенчался успехом. Помимо указанных в начале статьи недостатков, присущих этому средству измерения, автоматизация была лишь частичной, так как для получения более полной информации об объемах выемки необходимо было всякий раз вручную удалять так называемый окружающий «мусор», что находилось за пределами вскрышного забойного блока. К тому же так и не было найдено соответствующих алгоритмов фильтрации от попадания в изображение канатов и ковша в поле зрения лазерного луча.

Заключение

Несмотря на достаточно большое число исследований в области автоматизации учета производительности драглайнов, задача разработки системы

автоматического контроля объемов его работ до сих пор остается актуальной. Это связано с применением перспективных и современных бесконтактных технологий получения 3D-модели выемки и последующим расчетом объема по перемещению грунта. При известных геометрических параметрах забоя можно сформировать технические требования к выбору датчика изображения выемки с необходимым диапазоном измерения и разрешением.

В дальнейшем предлагается дополнить известную бортовую информационно-измерительную систему драглайна [8] алгоритмом контроля производительности по объему как в каждом цикле экскавации, так и за час, сутки, смену. Это позволит частично заменить или облегчить проведение маркшейдерских работ, повысить скорость и точность измерений, осуществлять контроль действий машиниста, создать условия для его обучения, повышения квалификации. Использование системы учета объемов вскрыши в составе АСУТП будет способствовать снижению годовых потерь при расчете производительности карьера и поможет четко планировать производственные процессы горного предприятия.

Список литературы

1. *Подэрни Р.Ю.* Горные машины и комплексы для открытых работ. М.: Недра. 1985. 544 с.
2. *Ridley P., Corke P.* Dragline automation // IEEE International Conference on Robotics and automation. 2001. Vol. 3. pp. 3742 - 4747.
3. *Панишев С.Ф., Сердобинцев В.В.* Повышение эффективности вскрышных работ на разрезе «Кангаласский» // Наука и образование. 2005. № 1. С. 17-20.
4. *Беляков Ю.И.* Проектирование экскаваторных работ. М.: Недра. 1983. 349 с.
5. *Haddad N.A.* From ground surveying to 3D laser scanner: A review of techniques used for spatial documentation of historic sites//Journal of King Saud University - Engineering Sciences. 2011, vol. 23, no 2. pp. 109-118.
6. *Певзнер Л.Д., Комский М.Ю.* Аналитический наблюдатель массы в ковше экскаватора// Физико-технические проблемы освоения полезных ископаемых. 1993. № 6. 19-25 с.
7. *Певзнер Л.Д.* Алгоритм определения транспортируемой массы породы в ковше драглайна// Горные машины и автоматика. 2001. № 6. С. 19-25.
8. *Вин Зо Хтэй, Л.Д. Певзнер, И.О.* Темкин. Алгоритмическое и аппаратное обеспечение бортовой информационной системы шагающего драглайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 2. С. 190-196.
9. *Roberts J., Winstenley G., Corce P.* Three-dimensional imaging for a very large excavator, The International Journal of Robotics Research. 2003. vol. 22. no. 7-8, pp. 467-477.
10. *Дрыгин М.Ю.* Разработка системы контроля и учета работы для карьерных экскаваторов типов драглайн и мехлопата// Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2020. № 1. С. 29-39.

Осипова Нина Витальевна — канд. техн. наук, доцент кафедры Автоматизации института «Информационных технологий и автоматизированных систем управления», Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов».
E-mail: nvo86@mail.ru