

Воронов Артем Юрьевич, канд. техн. наук, **Стенина Наталья Александровна**, канд. техн. наук, **Воронов Юрий Евгеньевич**, доктор техн. наук, профессор

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

E-mail: voronovayu@kuzstu.ru

СИСТЕМЫ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ НА КАРЬЕРАХ: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

Аннотация:

Актуальность работы. Системы диспетчеризации уже более полувека используются для управления горно-транспортными комплексами (ГТК) на открытых горных работах. Несмотря на большой опыт применения и проработанность этих систем, за это время накопились проблемы, ограничивающие их развитие. Проблемы возникают как из самой природы систем, так и из наличия «человеческого фактора» в горных работах, полностью избавиться от которого пока не удастся, поэтому задача обзора и анализа опыта применения систем диспетчеризации ГТК карьеров с целью выявления возможных направлений их дальнейшего совершенствования представляется актуальной.

Цель работы – обзор и анализ опыта применения систем диспетчеризации ГТК на карьерах с целью выявления направлений их дальнейшего совершенствования.

Методы исследования. В данной работе использованы методы теоретического и эмпирического познания: абстрагирование, сравнение, анализ и синтез.

Результаты. Представлены предпосылки возникновения систем диспетчеризации для карьеров, основные этапы их развития, а также выделены ожидаемые направления их дальнейшего совершенствования. Кроме этого, проанализированы методы управления и оптимизации, применяемые в системах диспетчеризации, и высказаны некоторые соображения о возможной роли имитационного моделирования в развитии этих систем.

Ключевые слова: карьер; горнотранспортный комплекс; управление; диспетчеризация; оптимизация

Информация о статье: принята 01 октября 2019 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-4-40-47

Предприятия по добыче полезных ископаемых открытым способом являются высокочрезвычайно затратными предприятиями с большими эксплуатационными расходами. Примерно 50% эксплуатационных затрат на карьерах (а на крупных карьерах – до 60%) связаны с погрузкой-разгрузкой и транспортированием горной массы [1]. Из всех видов взаимодействия с горной массой на карьерах наибольшие затраты приходится на транспортирование [2]. Поэтому оптимизация производственных планов и управления технологическим оборудованием в значительной степени влияет на эффективность работы карьера. По данным компании «Caterpillar», снижение непроизводительных простоев карьерных самосвалов всего на 1% экономит \$20 тыс. в год на 1 самосвал. Если же за счет снижения простоев убрать 1 самосвал из карьера, выгода составит минимум \$2 млн. в год [3]. В пересчете на рубли суммарная годовая экономия будет исчисляться десятками, а то и сотнями миллионов (в зависимости от величины предприятия).

В общем случае главная цель систем диспетчеризации (СД) – оптимизация производительности и эффективности карьера на основе данных реального времени. Более конкретно – СД призвана максимизировать производительность карьера,

минимизировать перегрузочные операции, обеспечить поток полезных ископаемых на обогатительную фабрику (ОФ) или на склад на требуемом уровне и соблюсти условия по качеству полезных ископаемых. Общепринятый подход – мультиуровневая оптимизация, при которой решение на каждом уровне используется на следующем уровне, а задача делится на три последовательно решаемых подзадачи: 1) модель поиска лучших путей; 2) оптимизация первичной расстановки самосвалов и экскаваторов (верхний уровень); 3) оптимизация распределения самосвалов в реальном времени (нижний уровень).

Модель поиска лучших путей определяет кратчайшие маршруты транспортирования между каждой парой пунктов в карьере. Оптимизация расстановки самосвалов и экскаваторов позволяет распределить имеющиеся транспортные ресурсы по зонам погрузки – с целью максимизации общей производительности самосвалов. Применяется статический алгоритм планирования – для определения оптимального расположения экскаваторов в забоях, оптимальных грузопотоков для каждого маршрута, соединяющего пункты погрузки с пунктами разгрузки, а также распределение транспортных ресурсов для выполнения производственного плана. При

распределении самосвалов в реальном времени программный алгоритм адресует самосвалы в подходящий пункт назначения к тому времени, как самосвал запросит новое назначение в соответствующем пункте, что позволит минимизировать отклонение от производственного плана.

СД чаще всего работают по двум различным схемам: 1) закрытый цикл (с закреплением самосвалов); 2) открытый цикл (без закрепления самосвалов). При закрытом цикле в начале каждой смены группа самосвалов закрепляется за каждым маршрутом транспортирования. Самосвалы, распределенные по маршрутам, должны работать на одном и том же маршруте всю смену, с учетом требований производства, наличия самосвалов и т. д. Маршруты, за которыми закреплены самосвалы, не меняются до тех пор, пока не сломается экскаватор, либо не произойдет критическое событие.

Исследователями предпринимались попытки усовершенствовать этот метод. В середине 1960-х годов предложили использовать радиосвязь между операторами оборудования и центром управления производством (ЦУП) [4]. В конце 70-х предложили устанавливать в ЦУП механические «диспетчерские панели» [5]. Данный метод организации производства наименее эффективен и используется как базовый метод («точка отсчета») для исследования эффективности других алгоритмов и подходов.

При открытом цикле в начале смены некоторое количество самосвалов назначается к конкретному экскаватору. Но эти самосвалы вместо того, чтобы обслуживаться одним экскаватором или работать на одном маршруте всю смену, будут получать новое назначение от СД после окончания каждой погрузки и разгрузки. Установлено, что открытый цикл дает большой рост производительности предприятия. В работе [6] сообщается о 13-процентном увеличении производительности медного карьера «Bougainville» при использовании открытого цикла. Там же сообщается о росте производительности на 10-15% на золотом прииске «Barrick Goldstrike», на 10% – на железорудном карьере компании «LTV Steel» и на 10% – на разрезе «Quintette». Авторы работы [7], промоделировав работу медного карьера «Sungun», показали, что при открытом цикле производительность карьера повышается на 8% по сравнению с закрытым циклом.

Принятие в реальном времени решений по назначению (адресации) карьерных самосвалов впервые было реализовано в начале 1960-х годов с внедрением радиосвязи между диспетчером и водителями самосвалов на карьере, работавшем по закрытому циклу. Сегодня системы оперативного управления карьерными ГТК по степени автоматизации можно разделить на 3 основные категории: закрытые, полуавтоматические и полностью автоматические. В закрытых системах адресация транспортных единиц не производится. Полуавтоматическая диспетчеризация развивается с ростом использования компьютеров и делится на пассивную и активную. В первом случае компьютер просто показывает текущую информацию о ситуации в карьере и не участвует в процессе принятия решений. Во втором случае

компьютер использует текущую информацию о карьере как входные данные, обрабатывает их по предварительно определенным алгоритмам и выдает диспетчеру список назначений для принятия решения. При автоматической диспетчеризации данные о текущем статусе карьера, а также о местоположении и состоянии горного оборудования собираются в главный компьютерный сервер, с которого затем отправляются назначения для самосвалов – после решения некоторых эвристических или математических программ [8].

Развитие СД на карьерах происходит на протяжении последних 50-55 лет. Первые системы, появившиеся в 70-х, работали в «ручном режиме» по закрытому циклу.

Система «Карат» решала следующие производственные задачи: оперативное планирование добычи руды в режиме усреднения ее качества; планирование транспортных средств и распределение их по пунктам погрузки и разгрузки; сбор первичной информации, ее обработка и выдача расчетных оперативных показателей работы ГТК для анализа, выработки решений и планирования на следующие смены. Система позволяла опознавать номера самосвалов на контрольных пунктах, взвешивать их по ходу, информировать о перевозимых объемах, контролировать самосвал при сходе его с линии. При резких изменениях производственной ситуации (выход из строя экскаваторов, изменение качества руды в забоях и т. д.) производилось перезакрепление самосвалов.

Основная функция модернизированной системы «Карат-М» состояла в оперативном управлении потоками транспортных единиц. Диспетчер получал возможность непосредственно воздействовать не только на отдельные самосвалы, но через них и на экскаваторы, а тем самым – на качественные и количественные параметры исходящего потока руды, на скорость подвигания добычных и вскрышных забоев.

Таким образом, система «Карат-М» работала в «диалоговом режиме», причем информация о состоянии экскаваторов и положении на пунктах разгрузки передавалась машинистами и операторами непосредственно в ЦУП диспетчеру по радио или телефону. Внедрение этой системы позволило снизить простой экскаваторов и автотранспорта в ожидании работы на 15-20%, повысить однородность качества руды на ОФ, увеличить коэффициент использования грузоподъемности автотранспорта на 17%. В то же время «Карат-М» и аналогичные ей системы не позволяли контролировать многие важные эксплуатационные характеристики работы автосамосвалов, что приводило к завышенным затратам на ГСМ, автошины, ТО и ремонты. В настоящее время системы подобного типа, устаревшие как технические, так и морально, не используются.

Более совершенными системами, внедренными в производство, стали «Комплекс-АТ», «Гермес» и «Авто». Функциональная структура последней включала в себя подсистемы планирования работы ГТК карьера на смену, оперативного управления маршрутом самосвала, учета добытой и

перевезенной горной массы за смену, контроля выполнения плановых заданий экскаваторами и самосвалами, контроля и учета объемов и качества руды на перегрузочных складах, формирования отчетных данных с представлением их управляющему персоналу. Планирование и управление осуществлялось в режиме усреднения качества руды на внутрикарьерных перегрузочных складах с минимизацией транспортной работы. Внедрение системы позволило увеличить сменную производительность парка самосвалов за счет сокращения простоев. В то же время контроль и учет именно эксплуатационных затрат на карьерные самосвалы напрямую не осуществлялся. Это стимулировало разработку СД второго поколения.

Одной из первых систем, прямо учитывающих эксплуатационные затраты на самосвалы, была система, запущенная в 1984 г. на разрезе «Нерюнгринский». Она решала следующие задачи: планирование грузоперевозок, учет и анализ показателей работы автомобилей, планирование техобслуживания, расчет заработной платы водителей.

Универсальная автоматизированная система управления технологическими процессами на руднике открытых работ – АСУ ТП POP – была внедрена в 1986 г. Для автотранспорта она выполняла следующие информационные задачи: оперативный учет выработки и средней загрузки самосвалов, анализ их работы и периодический контроль нахождения их на линии. Управляющие задачи состояли в распределении самосвалов между экскаваторами в начале смены, коррекции сменных планов в случае непредвиденных ситуаций и определении адресов погрузки и разгрузки самосвалов. Оператор мог перераспределять самосвалы при возникновении сбоев технологического процесса и корректировать текущую информацию при сбоях в работе самосвалов.

Однако опыт работы этих систем показал, что важнейшие элементы контроля эксплуатационных затрат – несанкционированные отклонения от маршрута и сливы топлива, мониторинг состояния агрегатов самосвала – остались без внимания.

Несмотря на техническое несовершенство, СД второго поколения функционировали вплоть до начала XXI в. Отмена ограничений полноценного использования спутниковой навигационной системы NavStar (GPS) для гражданских нужд открыла колоссальные возможности, в том числе и в управлении карьерными ГТК.

Современные СД карьерного транспорта в зависимости от решаемых задач можно условно разделить на 3 группы: системы спутникового мониторинга, системы контроля и учета, системы интеллектуального управления [9].

Системы спутникового мониторинга (АСК, «АвтоГРАФ», «Омникomm») с помощью встроенных приемников GPS/ГЛОНАСС получают координаты местонахождения транспортных средств и передают их в диспетчерский центр. Кроме координат передаются показания датчиков уровня топлива. Такие системы позволяют решать проблемы контроля потребления топлива и предотвращения его хищений

(это актуальный вопрос для отечественных предприятий), поэтому они находят широкое применение на малых и средних горнодобывающих предприятиях России. Значительного влияния на рост производительности ГТК эти системы не оказывают, так как изначально создавались под решение задач ограниченного мониторинга только автотранспорта.

В системах контроля и учета («Союзтехноком») датчики устанавливаются не только на автосамосвалы, но и на экскаваторы, что позволяет получить более широкое представление о технологических процессах, протекающих в карьере. Однако такие системы работают лишь в «ручном режиме» – производственно-управленческий персонал, получая отчеты системы о каких-либо нежелательных событиях, лишь пытается не допустить повторения этих событий в будущем. Но горное производство – это динамический, постоянно изменяющийся процесс, поэтому системы учета и контроля часто запаздывают с реакцией на процессы, происходящие при работе ГТК карьеров.

Основное назначение систем интеллектуального управления («КАРЬЕР») – обеспечение постоянного роста производительности ГТК за счет применения высокоэффективных математических моделей автоматизированного управления добычей и распределением транспортных потоков в карьерах с максимально возможной минимизацией влияния «человеческого фактора» на работу ГТК. В каждый момент времени система самостоятельно анализирует ситуацию в карьере и принимает решения по эффективному использованию имеющихся погрузочно-транспортных мощностей предприятия. Работают такие системы, как правило, по открытому циклу.

За рубежом достаточно быстро осознали выгоду интеллектуального управления ГТК карьеров, и уже в начале 1980-х гг. там начали появляться СД, работающие на этих принципах. Популярнейшей из них стала система DISPATCH фирмы «Modular Mining Systems» [10]. Чуть позже появилась система RAN фирмы «Pincot, Allen & Holt Inc.», а в 1983 г. – «Wenco», которой доверились 65 предприятий по всему миру [11].

Более «молодые» системы «Jmineops» от «Jigsaw Software» развернуты на 130 карьерах [12]. «TATA Consultancy Services» недавно представила систему «Dynamine», способную дать прирост производительности в 10-15% [13]. Однако настоящими «законодателями мод» в области СД ГТК должны стать «Micromine» с системой «Pitram» [14] и «Caterpillar» со своей «CAT MineStar Fleet» [15].

Несмотря на кажущуюся всестороннюю разработанность зарубежных систем интеллектуального управления ГТК, до сих пор существуют возможности их улучшения. Отметим некоторые последние достижения.

«Modular Mining Systems» предложила динамическую программу установки самосвалов под погрузку (Guided Spotting). Исходя из текущей ситуации, она в реальном времени выдает водителям самосвалов инструкции по оптимальному расположению у экскаватора. Это позволит использовать

двустороннюю погрузку, исключить лишние движения стрелы экскаватора, снизить вероятность «перестановки» самосвалов и связанных с этим простоев экскаваторов. Ожидаемый прирост производительности экскаваторов составит 34%; кроме того, значительно повысится безопасность горных работ.

«Wenco» в своей новой «System 6» объединила подсистемы «FleetControl» и «MineVision» в единое целое. Владение полной информацией о состоянии карьера должно дать диспетчерам больше пространства для маневра при распределении самосвалов, построении маршрутов и отслеживании производительности. Также представлено приложение «Activity Dispatch», направляющее самосвалы в точки, из которых они смогли бы наиболее эффективно продолжить работу после перерывов – при обедах, пересменах, буровзрывных работах и т. д.

«Hexagon Mining» представила «Atlas 3.3» с интерфейсом «Live Haulage», который позволяет пользователям управлять 3D-моделью карьера в реальном времени – без обращения к сторонним приложениям. Можно редактировать дорожную сеть, добавлять, удалять, перемещать и изменять сегменты трасс, а также добавлять, удалять и перемещать различные локации (отвалы, дробилки, перегрузочные склады и т. д.). Все это должно значительно упростить планирование горных работ.

«Caterpillar» продолжает совершенствовать функции анализа данных, получаемых из карьера и окружающей среды. К примеру, усовершенствованный прогноз погоды позволит предприятию планировать обслуживание оборудования на период, когда горные работы будут полностью или частично остановлены из-за плохой погоды. Это снизит вероятность неплановых простоев оборудования в периоды, когда погодные условия благоприятны. Продвинутый анализ данных позволит повысить техническую готовность парка самосвалов на 2-3%, степень его использования – на 5%, а также сократить расходы на ремонт на \$10 млн. в год [16].

В настоящее время наибольший эффект в достижении максимального роста производительности ГТК способны обеспечить системы интеллектуального управления с использованием автономных режимов работы оборудования. Удорожание горной техники при переходе на роботизированные машины быстро компенсируется ростом их производительности. Средняя скорость движения автономных самосвалов почти вдвое выше, чем скорость самосвалов, управляемых человеком. Кроме того, благодаря устранению «человеческого фактора» резко повышается безопасность горных работ. Все это позволит значительно снизить производственные издержки горнодобывающих компаний [9].

Работа над подобными системами сегодня ведется как в России («ВИСТ-Групп») с проектом «Интеллектуальный карьер»), так и за рубежом («Modular Mining Systems», «Mine of the future»). Но если в нашей стране такие комплексы пока на стадии разработки, то за границей они уже действуют. Еще в 2008 г. на одном из железорудных карьеров Западной Австралии были в тестовом режиме запущены несколько беспилотных машин. В 2015 г. линия

перевозки добываемой руды заработала уже на полную мощность. Сегодня горнодобывающая корпорация «Rio Tinto» на своих австралийских рудниках использует более 150 беспилотных карьерных самосвалов, которыми удаленно управляют операторы из центра в Перте, за 1200 км от места добычи. По оценкам, каждый такой самосвал может сэкономить около 500 рабочих часов в год.

Еще один пример – карьер «Bingham» в США. После катастрофического оползня в 2013 г. здесь пришлось перейти на автоматизированное управление экскаваторами, бульдозерами и другим оборудованием в нестабильных локациях [17].

Безусловно, подобные проекты крайне сложны как в разработке, так и в реализации. И аппаратное, и программное их обеспечение должно быть на высшем уровне.

Реальные проблемы зачастую слишком сложны, чтобы решить их на практике точными методами, поэтому на практике применимы лишь эвристические решения. Эвристические методы решения математически не обоснованы, но базируются на практических или логических процедурах управления. Некоторые эвристические методы часто дают хорошие результаты, но нет никакого математического доказательства, что эти результаты оптимальны или могут быть воспроизведены в любой момент. Тем не менее, эвристические методы популярны в диспетчеризации, потому что они легко внедряются и не требуют сложных вычислений при принятии диспетчерских решений, что особенно важно, когда решения должны приниматься в реальном времени.

Диспетчеризация ГТК карьеров – именно такой случай. Для эффективного управления время выработки решения должно быть меньше, чем частота наступления событий в реальности. Поэтому точные математические методы здесь, как правило, «вычислительно неприменимы» и в реальных СД на карьерах пока не используются.

Алгоритмы, используемые в коммерческих СД – это платная информация, и потому компании не хотят делать ее достоянием публики. Следовательно, сравнение эффективности различных СД затруднительно. Тем не менее, в 80-х и начале 90-х гг. «Modular Mining Systems» раскрыла модели и алгоритмы, на основе которых была разработана система DISPATCH [6, 18]. Впервые она была внедрена в 1980 г. (карьер «Tugone», штат Аризона) и с тех пор многократно модернизировалась, но основные принципы работы системы остаются неизменными уже почти 40 лет.

Для нахождения лучших путей DISPATCH использует алгоритм Дейкстры – для минимизации времени перемещения между каждой парой начальных и конечных пунктов. После этого в модель верхнего уровня поступает следующая информация: 1) минимальное расстояние и время движения для каждого конкретного вида транспорта; 2) узлы, через которые самосвалы должны пройти для достижения пунктов назначения.

Для оптимизации производственного плана на определенный период система использует линейное программирование (ЛП), разделяясь на две

отдельные, но тесно связанные модели. Первая оптимизирует общую выработку предприятия, включая добычу, переработку и накопление; вторая максимизирует производительность оборудования за счет минимизации суммарных объемов, требуемых к выработке, а также генерирует теоретический план добычи и перевозок, который учитывает производственные ограничения и позднее используется как база для генерации назначений самосвалов в реальном времени.

Первая часть представляет собой псевдо-стоимостную задачу ЛП; целевая функция определяется суммой затрат на все 4 технологические операции в карьере. Решение первой части представляет собой целевые показатели выработки экскаваторов с учетом максимальной скорости экскавации для экскаватора, максимальной мощности ОФ, а также нижних и верхних границ качества руды. Во второй части модели ЛП минимизируются суммарные транспортные ресурсы, требуемые для покрытия выработки экскаваторов. Это значит, что во второй части с помощью ЛП максимизируется выработка предприятия за счет назначения минимального количества самосвалов на каждый активный маршрут, чтобы выполнить план выработки по маршрутам.

Одно из преимуществ модели состоит в том, что она отражает текущее состояние карьера, используя данные реального времени. Кроме того, оптимальная выработка каждого маршрута задается количеством горной массы, а не количеством самосвалов. Это поможет на этапе диспетчеризации направить нужный самосвал, чтобы ликвидировать отставание от плана. Основным недостатком модели – она не учитывает ограничение коэффициента вскрыши в карьере. Установив нижнюю границу скоростей экскавации в нуле, разработчики позволили модели игнорировать экскаваторы, работающие с пустой породой. Кроме того, требование по качеству ограничено предопределенными верхними и нижними пределами. Это неизбежно вызовет краткосрочное воздействие и на выход ОФ (количество конечного продукта), и на вход (использование некоторых конкретных экскаваторов, которое должно выполняться каждую минуту). Однако главные недостатки системы заключены в модели оперативной диспетчеризации.

После решения задачи ЛП верхнего уровня – оптимизации выработки, результатом чего являются оптимальные грузопотоки на маршрутах – система задействует динамическое программирование (ДП) для адресации самосвалов в подходящие пункты назначения. Для этого определяются два списка и три параметра. Формируются списки «нуждающихся» экскаваторов (маршрутов), выбранных моделью ЛП, и самосвалов, разгружающихся в пунктах разгрузки, либо находящихся на пути от пункта погрузки до пункта разгрузки. Также вычисляется «время требования», которое определяется как ожидаемое время до возникновения следующей потребности в самосвале на каждом маршруте. Самый «нуждающийся» маршрут, идущий первым в списке самых «нуждающихся» экскаваторов, будет маршрутом с наименьшим «временем требования».

Затем определяются «потерянные тонны», которые используются как критерий выбора «лучшего» самосвала для самого «нуждающегося» маршрута – из списка самосвалов. Самосвал, покрывающий «потерянные тонны» самого «нуждающегося» экскаватора наилучшим образом, является «лучшим». После того, как «лучший» самосвал назначен к самому «нуждающемуся» экскаватору, этот экскаватор перемещается на последнюю строчку в списке «нуждающихся» маршрутов, и процедура повторяется для второго, который теперь становится самым «нуждающимся» – до тех пор, пока все самосвалы в своем списке не получают назначение.

Скользкий горизонт планирования, когда выполняются последовательные назначения, является преимуществом модели. Информация о состоянии карьера, используемая в модели, всегда свежая. Однако модель не учитывает влияние текущего назначения на последующие, хотя учитываются все самосвалы, назначенные до этого. Другой недостаток модели в том, что, несмотря на утверждения разработчиков, метод решения не относится к ДП. Это эвристический метод, решающий каждую подзадачу на основе лучших решений предыдущих подзадач. Согласно [1], неправильное отнесение метода решения к ДП произошло из-за недопонимания принципа оптимальности Беллмана: какими бы ни были начальное состояние и начальное решение, последующие решения должны составлять оптимальный курс действий по отношению к состоянию, полученному в результате первого решения. Иными словами, оптимальная стратегия зависит только от текущего состояния и цели и не зависит от предыстории.

Все это не помешало системе DISPATCH стать лидером по числу внедрений. Она развернута примерно на 200 карьерах по всему миру [10].

Как можно заключить, слабость существующих СД ГТК состоит в том, что, учитывая предыдущие решения по назначению машин к экскаваторам, они не способны учесть, к чему эти решения приведут в будущем. Чтобы устранить этот недостаток, необходимо более активно использовать имитационное моделирование (ИМ).

Имитационная модель – это наглядное представление какого-либо реального процесса или системы во времени. Применение ИМ в горном деле берет начало в 1940-х гг. Однако первое использование дискретно-событийного ИМ, обычно используемого для оценки СД ГТК, имело место в работе [19], где автор применил метод Монте-Карло для решения транспортных проблем на горнодобывающих предприятиях.

После первого использования ИМ в горном деле было выполнено множество работ, посвященных этому. Затем в первом десятилетии XXI в. для имитации динамического расширения карьера была разработана имитационная модель, названная «симулятором открытых горных работ» [20]. Это исследование показало, что в случае динамичности моделируемых процессов и случайности входных параметров симуляторы на основе искусственного интеллекта могут быть весьма эффективны и полезны.

В работе [21] дискретно-событийная модель связана с оптимизационной моделью краткосрочного планирования. Для анализа и оценки влияния отказов оборудования на степень использования ресурсов и производительность предприятия в работе [22] объединили дискретно-событийную модель с моделью оценки надежности, основанной на генетическом алгоритме. В работе [23] приводится пошаговая инструкция по дискретно-событийному моделированию выбора оборудования для ГТК карьеров.

С 2010 по 2015 гг. почти все полевые исследования ГТК карьеров с применением ИМ используют ИМ как инструмент для оценки разработанных алгоритмов оптимизации производства, либо для отслеживания движения самосвалов. В одном из последних имитационных исследований ГТК карьера [24] исследуется, как корреляция между входными параметрами влияет на результаты оценок работы ГТК. Представлен новый подход к определению и введению коррелированных параметров в имитационную модель ГТК: вместо независимых распределений генерируется многомерный случайный вектор, представляющий входные параметры в модели.

Но можно пойти и дальше, используя результаты расчетов на имитационных моделях непосредственно при диспетчеризации карьерного транспорта. Некоторые из действующих СД имеют в своем составе инструменты анализа «что, если», позволяющие «проигрывать» различные сценарии горных работ до их реализации. Однако возможные сценарии касаются лишь структуры ГТК: добавление, снятие или замена самосвала, перемещение или замена экскаватора и т. д. Для действительно же эффективного управления необходимо знать не только то, что было до текущего назначения самосвала, но и то, к чему это назначение может привести в будущем.

В работе [25] показано, как можно этого добиться. Через определенные интервалы времени (например, перед началом каждой смены) имитационная модель ГТК карьера прогоняется при различных вариантах его структуры и выбранном внутреннем критерии адресации самосвалов. Временные характеристики процессов берутся из исторических данных, записанных системой. В критерий адресации вводятся численные параметры приоритетности экскаваторов и соответствующих им маршрутов; после многократных прогонов модели подбираются такие значения параметров, при которых результат работы ГТК наилучшим образом соответствует внешнему критерию оптимизации (например, максимум выработки). Параметры сводятся в отдельную базу данных и используются для принятия решений по адресации самосвалов к экскаваторам.

Разумеется, здесь возникнет проблема свежести данных, поскольку горные работы – процесс динамический и многообразный. Поэтому входные данные для каждого запуска программы рекомендуется брать из текущей смены – за время работы модели они вряд ли значительно изменятся.

Когда удастся реализовать данный принцип «превентивной диспетчеризации» (а предпосылки к этому нами уже созданы), будет устранен один из

главных недостатков современных СД, которые пока не способны полноценно заглядывать в будущее..

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alarie, S. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines / S. Alarie, M. Gamache // *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. – 2002. – № 16(1). – P. 59-76.
2. Curry, J.A. Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding / J.A. Curry, M.J.L. Ismay, G.J. Jameson // *Minerals Engineering*. – 2014. – № 56. – P. 70-80.
3. Three ways truck assignment impacts your bottom line. – Caterpillar Inc., 2016.
4. Bogart, J.R. Electronic eyes and ears monitor pit operations // *Metal Mining and Processing*. – Mar 1964. – P. 48-52.
5. Mueller, E.R. Simplified dispatching board boosts truck productivity at Cyprus Pima // *Mining Engineering (Littleton)*. – 1977. – № 29(8). – P. 40-43.
6. Olson, J.P. On improving truck/shovel productivity in open pit mines / J.P. Olson, S.I. Vohnout, J.W. White // *CIM Bulletin*. – 1993. – № 86(973). – P. 43-49.
7. Hashemi, A. Application of ARENA simulation software for evaluation of open pit mining transportation systems – a case study / A. Hashemi, J. Sattarvand // *12th International Symposium Continuous Surface Mining*. – Aachen : Springer International Publishing, 2015.
8. Afrapoli, A.M. Mining fleet management systems: a review of models and algorithms / A.M. Afrapoli, H. Askari-Nasab // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. – 2017. – P. 1-19.
9. Мачулов, В.Н. Системы управления горно-транспортных комплексов // *Горная промышленность*. – 2013. – № 6(112). – С. 88-92.
10. Техническое описание систем «Modular Mining Systems». – Modular Mining Systems, 2013.
11. Автоматизированные системы управления «Wenco» для карьеров. – Wenco International Mining Systems Ltd., 2015.
12. Leica Jigsaw Jmineops - Dispatch, Reporting & Production Optimization. – Leica Geosystems, 2012.
13. TCS's Integrated Mine Operations Solution. – TATA Consultancy Services, 2012.
14. Pitram Mining Solutions. – Micromine, 2011.
15. CAT® MINESTAR™ Fleet. – Caterpillar Inc., 2013.
16. Carter, R.A. Fleet management systems expand their capabilities // *Engineering & Mining Journal*. – Nov 2016. – P. 50-53.
17. Райнеш, Е. Робот за рулем // *Уголь Кузбасса*. – 2017. – № 3. – С. 22-27.
18. White, J.W. Computer-based dispatching in mines with concurrent operating objectives / J.W. White, J.P. Olson // *Mining Engineering (Littleton)*. – 1986. – № 38(11). – P. 1045-1054.
19. Rist, K. The solution of a transportation problem by use of a Monte Carlo Technique // *APCOM 1*. – Tucson, AZ : SME. – 1961.
20. Askari-Nasab, H. Modelling open pit dynamics using discrete simulation / H. Askari-Nasab, S.

Frimpong, J. Szymanski // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2007. – № 21(1). – P. 35-49.

21. Concurrent simulation and optimization models for mining planning / M.M. Fioroni [et al.] // 2008 Winter Simulation Conference. – Miami, FL. – 2008.

22. Yuriy, G. Discrete-event simulation of mine equipment systems combined with a reliability assessment model based on genetic algorithms / G. Yuriy, N. Vayenas // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2008. – № 22(1). – P. 70-83.

23. Dindarloo, S.R. A stochastic simulation framework for truck and shovel selection and sizing in open

pit mines / S.R. Dindarloo, M. Osanloo, S. Frimpong // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2015. – № 115(March). – P. 209-219.

24. Que, S. Effect of ignoring input correlation on truck-shovel simulation / S. Que, A. Anani, K. Awuah-Offei // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2016. – № 30(5-6). – P. 405-421.

25. Воронов, А.Ю. Оптимизация показателей эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов : дис. ... канд. техн. наук. – КузГТУ, Кемерово, 2015.

Artyom Y. Voronov, C. Sc. in Engineering, **Natalya A. Stenina**, C. Sc. in Engineering, **Yuri E. Voronov**, Dr. Sc. in Engineering, Professor

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

DISPATCHING SYSTEMS AT OPEN-PIT MINES: THE PAST, THE PRESENT AND THE FUTURE

Abstract:

The urgency of the discussed issue. For more than half a century, dispatching systems have been used to manage mining transport systems (MTSs) in open-pit mines. Despite the great experience of application and the elaboration of these systems, problems have accumulated during this time, limiting their development. Problems arise both from the nature of the systems, and from the presence of a “human factor” in mining, which has not yet been completely eliminated. Therefore, a review and analysis of the experience of using the dispatching systems for MTSs at open-pit mines in order to identify possible directions for their further improvement seems to be an urgent task.

The main aim of the study is to review and analyze the experience of using the dispatching systems for open-pit MTSs in order to identify directions for their further improvement.

The methods used in the study. In this paper, the methods of theoretical and empirical knowledge are used such as abstraction, comparison, analysis and synthesis.

The results. Prerequisites for the emergence of dispatching systems for open-pit mines, the main stages of their development are presented, and the expected directions for their further improvement are highlighted. In addition, the management and optimization methods used in dispatching systems are analyzed, and some considerations are made on the possible role of simulation in the development of these systems.

Keywords: open-pit mine; mining transport system; management; dispatching; optimization

Article info: received October 01, 2019

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-3-40-47

REFERENCES

1. Alarie S. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines / S. Alarie, M. Gamache // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. 2002. № 16(1). P. 59-76.

2. Curry J.A. Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding / J.A. Curry, M.J.L. Ismay, G.J. Jameson // Minerals Engineering. 2014. № 56. P. 70-80.

3. Three ways truck assignment impacts your bottom line. Caterpillar Inc., 2016.

4. Bogart J.R. Electronic eyes and ears monitor pit operations. Metal Mining and Processing. Mar 1964. P. 48-52.

5. Mueller E.R. Simplified dispatching board boosts truck productivity at Cyprus Pi-ma. Mining Engineering (Littleton). 1977. № 29(8). P. 40-43.

6. White J.W. On improving truck/shovels productivity on open pit mines / J.P. Olson, S.I. Vohnout, J.W. White // CIM Bulletin. 1993. № 86(973). P. 43-49.

7. Hashemi A. Application of ARENA simulation software for evaluation of open pit mining transportation systems – a case study / A. Hashemi, J. Sattarvand // 12th International Symposium Continuous Surface Mining. Aachen: Springer International Publishing, 2015.

8. Afrapoli A.M. Mining fleet management systems: a review of models and algorithms / A.M. Afrapoli, H. Askari-Nasab // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2017. P. 1-19.

9. Machulov V.N. Sistemy upravlenija gornotransportnyh kompleksov [Mining fleet management systems]. Mining Industry. 2013. № 6(112). P. 88-92. (rus)

10. Tehnicheskoe opisanie sistem «Modular Mining Systems» [Technical description of Modular Mining systems]. Modular Mining Systems, 2013. (rus)

11. Avtomatizirovannye sistemy upravlenija «Wenco» dlja karjerov [Wenco automated management systems for open-pit mines]. Wenco International Mining Systems Ltd., 2015. (rus)

12. Leica Jigsaw Jmineops - Dispatch, Reporting & Production Optimization. Leica Geosystems, 2012.

13. TCS's Integrated Mine Operations Solution. TATA Consultancy Services, 2012.

14. Pitram Mining Solutions. Micromine, 2011.

15. CAT® MINESTAR™ Fleet. Caterpillar Inc., 2013.

16. Carter R.A. Fleet management systems expand their capabilities. Engineering & Mining Journal. Nov 2016. P. 50-53.

17. Rainesh E. Robot za ruljom [Robot behind the wheel]. Kuzbass Coal. 2017. № 3. P. 22-27. (rus)

18. White J.W. Computer-based dispatching in mines with concurrent operating objectives / J.W. White, J.P. Olson // Mining Engineering (Littleton). 1986. № 38(11). P. 1045-1054.

19. Rist K. The solution of a transportation problem by use of a Monte Carlo Technique. APCOM 1. Tucson, AZ: SME. 1961.

Библиографическое описание статьи

Воронов А.Ю., Стенина Н.А., Воронов Ю.Е. Системы диспетчеризации на карьерах: прошлое, настоящее и будущее // Горное оборудование и электромеханика – 2019. – № 4 (144). – С. 40-47.

20. Askari-Nasab H. Modelling open pit dynamics using discrete simulation / H. Aska-ri-Nasab, S. Frimpong, J. Szymanski // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2007. № 21(1). P. 35-49.

21. Concurrent simulation and optimization models for mining planning / M.M. Fioroni [et al.] // 2008 Winter Simulation Conference. Miami, FL. 2008.

22. Yuriy G. Discrete-event simulation of mine equipment systems combined with a re-liability assessment model based on genetic algorithms / G. Yuriy, N. Vayenas // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2008. № 22(1). P. 70-83.

23. Dindarloo S.R. A stochastic simulation framework for truck and shovel selection and sizing in open pit mines / S.R. Dindarloo, M. Osanloo, S. Frimpong // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2015. № 115(March). P. 209-219.

24. Que S. Effect of ignoring input correlation on truck-shovel simulation / S. Que, A. Anani, K. Awuah-Offei // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2016. № 30(5-6). P. 405-421.

25. Voronov A.Yu. Optimizatsija pokazatelei eksploatacionnoi proizvoditelnosti ek-skavatorno-avtomobilnyh kompleksov razrezov [Optimization of indicators of the shovel-truck system performance at open-pit coal mines]. PhD thesis. Kemerovo: KuzSTU, 2015. (rus)

Reference to article

Voronov A.Y., Stenina N.A., Voronov Yu.E. Dispatching systems at open-pit mines: the past, the present and the future. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 4 (144), pp. 40-47.