

УДК 622.23.05

ОБ УПРАВЛЕНИИ КОМПЛЕКСАМИ БЕСПИЛОТНОГО КАРЬЕРНОГО АВТОТРАНСПОРТА

Воронов А. Ю., канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры ЭА
Суспицына С. Э., магистрант гр. АПмз-251, I курс
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева,
г. Кемерово

В последние годы, по мере быстрого развития искусственного интеллекта, автоматического управления и сенсорных технологий, технология автономного вождения получает все более широкое применение в различных областях, особенно в промышленных сценариях с высокими рисками, где она продемонстрировала большой потенциал. В горнодобывающей промышленности рабочая среда открытых карьеров зачастую очень сложна и сурова, со множеством потенциальных опасностей, таких как оползни, взрывы и пыль. Поэтому вопрос повышения безопасности и эффективности горных работ является ключевой проблемой как для ученых, так и для промышленников.

Беспилотные карьерные автосамосвалы, как типичные приложения технологии автономного вождения, постепенно становятся незаменимыми инструментами на открытых горных работах. Они существенно сокращают участие человека, тем самым уменьшая количество несчастных случаев во время работы, а также повышая точность планирования и эффективность транспортирования. Кроме того, как указано в работе [1], отсутствие водителей позволяет значительно увеличить время полезного использования рабочего времени самосвалов, так как отсутствуют пересмены и простои во время обедов.

Интеллектуальные транспортные системы, основанные на автономном управлении самосвалами, стали важной тенденцией в развитии «умных» карьеров. Автономное управление самосвалами использует технологию автономного вождения для автоматического управления и контроля маршрутов движения самосвалов, обеспечивая эффективную доставку грузов в карьере.

В теории и практике автономного управления карьерными самосвалами были разработаны различные методы планирования для разных сценариев. К ним относятся планирование на основе правил, методы математической оптимизации (линейное и целочисленное программирование), эвристические и метаэвристические алгоритмы, машинное обучение и обучение с подкреплением, планирование в реальном времени на основе граничных вычислений и др. В практических приложениях подходящие методы часто выбираются на основе конкретных характеристик и целей горнодобывающего предприятия.

Система управления (диспетчеризации) комплексом беспилотного карьерного автотранспорта осуществляет интеллектуальное планирование по-

средством планирования маршрутов, сокращая потери времени при транспортировании и повышая общую эксплуатационную производительность. С экономической точки зрения, система снижает транспортные расходы за счет оптимизации маршрутов и снижения энергопотребления, тем самым обеспечивая эффективную, безопасную и интеллектуальную работу на карьере.

Несмотря на многочисленные преимущества, продемонстрированные беспилотными карьерными самосвалами на практике, существующие методы диспетчеризации до сих пор имеют определенные ограничения. Во-первых, традиционные стратегии диспетчеризации, как правило, сосредоточены только на планировании маршрутов, не обеспечивая точного контроля скорости самосвала, что ограничивает гибкость и интеллектуальные возможности технологии автономного вождения. Во-вторых, при открытой добыче полезных ископаемых существует множество неопределенностей, таких как динамические изменения рельефа карьера, ухудшение технического состояния оборудования и погодные колебания, которые могут существенно повлиять на провозную способность самосвалов. Поэтому разработка эффективной модели диспетчеризации, которая в полной мере учитывает эти неопределенности и оптимизирует управляющие решения, является ключевой задачей для повышения эффективности горных работ и использования ресурсов.

В процессе открытых горных работ транспорт, как ключевое звено всего производственного процесса, оказывает жизненно важное влияние на производство. В карьере имеется множество погрузочных и разгрузочных пунктов. В пунктах погрузки полезное ископаемое или вскрыша загружаются в самосвалы экскаваторами, а самосвалы транспортируют эти грузы в пункты разгрузки – склады или отвалы. Полный оборот самосвала от пункта погрузки до пункта разгрузки называется рейсом. Задача планирования работы самосвалов заключается в распределении задач по рейсам между каждым самосвалом и определении времени выполнения всех операций рейса.

В настоящее время исследования в области планирования работы самосвалов не в полной мере используют преимущества беспилотных самосвалов в точном управлении. Необходима совместная оптимизация маршрутов и скорости самосвалов для повышения эффективности планирования. Водители-люди, как правило, ездят с максимально возможной скоростью, даже если в пункте назначения возникнут заторы, приводящие к простоям. Беспилотные же самосвалы способны регулировать свою скорость в ответ на ожидаемые заторы, избегая непроизводительных простоев и снижая расход топлива.

Авторы работы [2] продемонстрировали эмпирическое распределение вероятностей расхода топлива карьерных самосвалов, построенное на основе различных моделей средней скорости, доказав положительное влияние контроля скорости машины на стоимость и эффективность транспортирования. Благодаря принятию решений и точному управлению интеллектуальной системой планирования, транспортирование технологических грузов может осуществляться по рациональным маршрутам, повышая эффективность использования транспорта и снижая эксплуатационные затраты. Более того,

точное управление скоростью беспилотных самосвалов позволяет эффективно регулировать транспортные потоки, предотвращая заторы и сокращая очереди.

Также в процессах погрузочно-транспортных работ существует множество неопределенностей. Автор работы [3] в результате анализа работы карьера обнаружил, что данные о работе самосвалов, такие как скорость в грузовом и порожняковом направлениях, время погрузки и разгрузки и т. д., нестабильны. Различные факторы, влияющие на погрузочно-транспортные процессы, можно условно разделить на две категории: внешние факторы (окружающая среда) и внутренние факторы (техническое состояние самого самосвала).

К внешним факторам относятся качество дорог, погодные условия и время погрузки-разгрузки. Плохое качество дорог – неровная поверхность, слишком глубокие колеи и т. д. – приводит к тряске самосвалов, увеличению времени груженого и порожнего пробега и снижению производительности; климатические события, особенно дожди, которые делают поверхность дороги мокрой, заставляя самосвалы скользить и снижать скорость, также могут привести к увеличению времени пробега; различия в параметрах погрузки и разгрузки, такие как количество и типы экскаваторов, а также вес груза, напрямую влияют на общую изменчивость времени пробега.

Что касается внутренних факторов, то техническое состояние самосвалов также оказывает важное влияние на эффективность их работы. По мере увеличения пробега самосвала его производительность снижается, а состояние двигателя, износ шин и уровень планового технического обслуживания влияют на его провозную способность. Самосвалы, которые регулярно обслуживаются и находятся в хорошем состоянии, способны более эффективно выполнять свои транспортные задачи, в то время как самосвалы с неисправностями неэффективны и представляют большую угрозу безопасности.

Автор работы [4] подтвердил влияние этих неопределенностей на работу карьерных самосвалов путем анализа данных о времени пробега с грузом и без груза. Для эффективного решения таких проблем необходимо использовать подход к планированию, который интегрирует теоретическое моделирование с практическими соображениями, а не полагается исключительно на эмпирические данные. Такая интеграция может значительно повысить точность и экономическую эффективность планирования производства.

В последние годы достигнут значительный прогресс в исследованиях систем диспетчеризации беспилотных карьерных самосвалов. Разработка реалистичной модели диспетчеризации требует учета таких факторов, как стоимость, производительность оборудования, условия работы карьера, погодные условия и т. д. Исходя из этого, различные исследователи разработали множество моделей диспетчеризации с различных точек зрения.

Традиционные модели диспетчеризации карьерного автотранспорта учитывают производительность, стоимостные показатели и качество полезных ископаемых. Некоторые исследователи рассматривали множественные производственные требования, создавая многоцелевые модели оптимизации.

Исходя из различных практических нужд, создавались модели, посвященные планированию транспортных потоков, диспетчеризации в реальном времени, новым источникам энергии, требованиям конкретных предприятий и неопределенностям в процессе горных работ. Для решения этих моделей обычно используются математические методы и интеллектуальная оптимизация.

Изучение существующих методов моделирования и решения задач планирования работы карьерных самосвалов показало, что большинство моделей являются детерминированными в идеальных условиях, игнорируя факторы неопределенности динамических изменений в реальном производстве. Эти неопределенности усложняют оптимизацию маршрутов и скорости самосвалов для более точного управления комплексами беспилотных машин.

Для решения этих вопросов в работе [1] была предложена двухуровневая модель такого управления. Модель создана для угольного разреза, но при желании может быть расширена и для рудных карьеров.

На верхнем уровне проводится имитационное моделирование предстоящей смены (обучение). Для определения входных параметров модели используются фактические длительности технологических операций. В этих значениях отражается все: состояние трасс и машин, скорости и т. д. В результате обучения определяются оптимальные параметры приоритетности маршрутов и оптимальное количество самосвалов для работы на группе маршрутов без закрепления за экскаваторами. Главным критерием оптимизации выступает критерий минимума потерь от простоев оборудования за смену.

Параметры приоритетности маршрутов используются в критерии принятия решений по текущему распределению самосвалов на нижнем уровне модели. Эти параметры отражают важность маршрутов в течение всей смены, поэтому можно ожидать, что назначения самосвалов также будут оптимальны в течение всей смены. Параметры сводятся в базу данных и в дальнейшем используются для принятия диспетчерских решений. Параметры переоцениваются при любом значительном событии (например, замене экскаватора), либо через определенное время (например, перед началом каждой смены).

В заключение можно сделать вывод, что для повышения качества управления нужно активнее использовать инструменты имитационного моделирования и машинного обучения, так как лишь они способны создать объективную картину протекающих стохастических процессов.

Список литературы

1. Воронов, А. Ю. Диспетчеризация в карьерных экскаваторно-автомобильных комплексах с беспилотным транспортом / А. Ю. Воронов, Ю. Е. Воронов, Д. М. Дубинкин, О. С. Максимова // Уголь. – 2023. – № 9(1171). – С. 75-83.
2. Zhang, X. Real-time scheduling of autonomous mining trucks via flow allocation-accelerated tabu search / X. Zhang, A. Guo, Y. Ai, B. Tian, L. Chen //

- IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. – 2022. – Vol. 7, no. 3. – P. 466–479.
3. Chen B. Optimization model and application of truck scheduling in open pit mine considering transport uncertainty. – Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.
 4. Wan S. Study on truck dispatching problem in open-pit mine considering uncertain factors. – Shenyang University of Technology, 2022.