

УДК 622

**РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ КАРЬЕРНОГО
ТРАНСПОРТА В SIMULINK ДЛЯ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПЕРЕВОЗОК**

Латфуллина А.Ф., младший инженер-технолог
Уткаев Е.А., к.т.н., ведущий инженер-технолог
ЗАО «Углеметан Сервис», г. Кемерово
Научный руководитель: Марков С.О., к.т.н., доцент
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

Аннотация: В современных условиях горнодобывающей промышленности повышение операционной эффективности карьерных перевозок является критически важным фактором для снижения себестоимости добычи и увеличения конкурентоспособности. Данная статья посвящена разработке и применению имитационной модели карьерного транспорта в среде MATLAB Simulink. Представленная модель позволяет детально анализировать динамику перевозочного процесса, оценивать влияние различных параметров на пропускную способность, среднее время цикла, загрузку парка и другие ключевые показатели эффективности. Особое внимание уделяется верификации модели и демонстрации ее применимости для решения практических задач оптимизации логистики в условиях действующего карьера.

Ключевые слова: карьерный транспорт, имитационное моделирование, Simulink, оптимизация перевозок, эффективность, горнодобывающая промышленность, логистика, пропускная способность, автотранспорт.

Кузнецкий угольный бассейн занимает ключевое место в топливно-энергетической системе России и является одним из уникальных центров горнодобывающей промышленности. Его общие запасы угля достигают 637 млрд тонн, из которых 548 млрд тонн составляют высококачественные кондиционные угли. Для открытых горных работ доступны примерно 14 млрд тонн угля. В 2017 году Кузбасс отметил семьдесят лет с момента начала открытой добычи. Добыча угля (2021) 210,4 млн. т (доля бассейна в годовой добыче угля РФ 48 %). Угли используются как технологическое сырьё и высококачественное энергетическое топливо. Сегодня более 60% добываемого в бассейне угля приходится именно на открытые методы. Расширение числа угледобывающих компаний способствует росту объемов добычи, а введение в строй новых обогатительных фабрик значительно повышает качество выпускаемой продукции. Ведётся активное техническое обновление разрезов, что позволяет увеличить полноту извлечения угля и повысить мощность оборудования для выемочно-погрузочных работ. В

процессе добычи широко применяются современные гидравлические и электрические экскаваторы отечественного и зарубежного производства, а для вскрышных работ в безугольной зоне используются экскаваторы с крупными ковшами, что увеличивает эффективность вскрышных работ [1, 2].

Объектом исследования является один из ключевых филиалов угольного комплекса региона, обеспечивающий значительный вклад в энергетическую и экономическую инфраструктуру. В работе создаётся имитационная модель карьерного транспорта на дизельном или газомоторном топливе [3, 4]. В качестве среды моделирования использована программная платформа Simulink, направленная на детальный анализ и оптимизацию перевозочных процессов. Разрабатываемая модель позволяет воспроизводить динамику транспортировки угля, что способствует повышению эффективности и надёжности работы горнодобывающего комплекса в условиях современных требований производства.

Имитационное моделирование представляет собой метод, который позволяет создавать модели, отражающие поведение процессов так, как если бы они происходили в реальности [5].

Simulink — это программная платформа для имитационного математического моделирования, ориентированная на описание и анализ динамических процессов [6].

Динамическим называют процесс, при котором параметры объекта изменяются во времени под воздействием внутренних или внешних факторов. Такой набор параметров также называют состоянием объекта. Имитационное моделирование даёт возможность воспроизвести развитие процессов в различных условиях — при изменении начальных параметров и внешних воздействий. Качество и достоверность результатов моделирования напрямую зависят от точности и полноты построенной модели, поэтому реалистичность модели является ключевым фактором при анализе процессов.

Реальным примером применения программ для моделирования является реализация учеными КузГТУ таких проектов, как:

- «Разработка беспилотного карьерного автосамосвала» в рамках комплексной научно-технической программы «Чистый уголь – зелёный Кузбасс» [7];
- «Разработка компьютерной модели угольной шахты с «умным» электроснабжением» [8].

В целях повышения эффективности работы горного участка была разработана модель экскаваторно-автомобильного комплекса для одного из угольных разрезов. Для построения модели были использованы данные диспетчерского отдела:

- Время погрузки экскаватором;
- Время движения с грузом;
- Время разгрузки;
- Время движения без груза.

Для построения базовой модели были применены временные показатели

от минимального до максимального значения. Время моделирования составляет 720 минут, что соответствует времени одной рабочей смены. Имитационные модели работы горного оборудования на участке, построенные в системе MATLAB Simulink, представлены на рисунке 1.

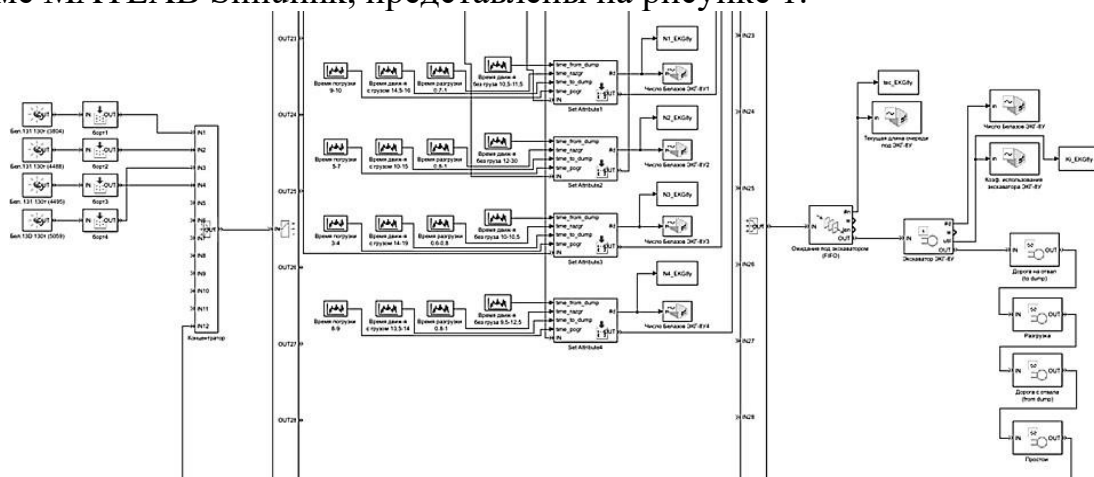


Рис. 1 – Имитационная модель работы ЭКГ-8У

В данной модели порядок блоков соответствует последовательности событий, которые происходят на горном участке в реальном времени:

1. В начале смены все автосамосвалы приобретают номер борта (номер борта соответствует номеру входного порта «OUT»), под которым они заходят в блок «Концентратор». Из данного блока БелаЗы попадают в «Блок присвоения атрибутов времени» (это нужно для работы модели);
2. После попадания в «Блок присвоения атрибутов времени» каждый автосамосвал приобретает себе атрибуты, а именно: время погрузки экскаватором, время движения с грузом на отвал, время разгрузки на отвале, время движения с отвала без груза;
3. Когда автосамосвалам присвоены временные показатели, они попадают в блок «Ожидание под экскаватором» (FIFO) и каждый в порядке очереди загружается экскаватором;
4. Далее автосамосвал в груженном состоянии едет на отвал с тем временем, которое было присвоено ему в «Блоке присвоения атрибутов времени», разгружается там (блок с установленным временем «Разгрузки») и едет обратно с отвала (блок с установленным временем «Дорога с отвала»);
5. После этого автосамосвалам заново присваиваются новые временные параметры;
6. Мнимый автосамосвал под названием «Обед», который ранее нигде не учитывался, появляется через 320 минут после начала моделирования (в середине рабочей смены на предприятии). Он так же, как и БелаЗы, имеет свой атрибут – «время обеда». Данный «БелаЗ» вне очереди попадает под экскаватор и задерживает там другие автосамосвалы на время обеда, после чего исчезает, что показывает работоспособность комплекса, а не его аварийную остановку.

Проанализировав модель базового варианта работы экскаваторов и решив для каждого экскаватора добавить по несколько автосамосвалов, была оптимизирована работа экскаваторно-автомобильного комплекса на горном участке с возможностью изменения общего количества транспортных единиц, провести оценку эффективности работы горного участка после оптимизации работы горного оборудования. Оптимизированные модели работы горного оборудования представлены на рисунке 2.



Рис. 2 – Имитационная модель работы ЭКГ-8У после проведения оптимизации

Построив модели до и после оптимизации, мы получили ряд графиков зависимостей, которые послужили основой для анализа состояния работы горного участка:

- коэффициент использования экскаватора;
- текущая длина очереди автосамосвалов;
- число БелАЗов, погруженных экскаватором в течение смены.

Графики зависимостей модели представлены на рисунках 3 – 5.

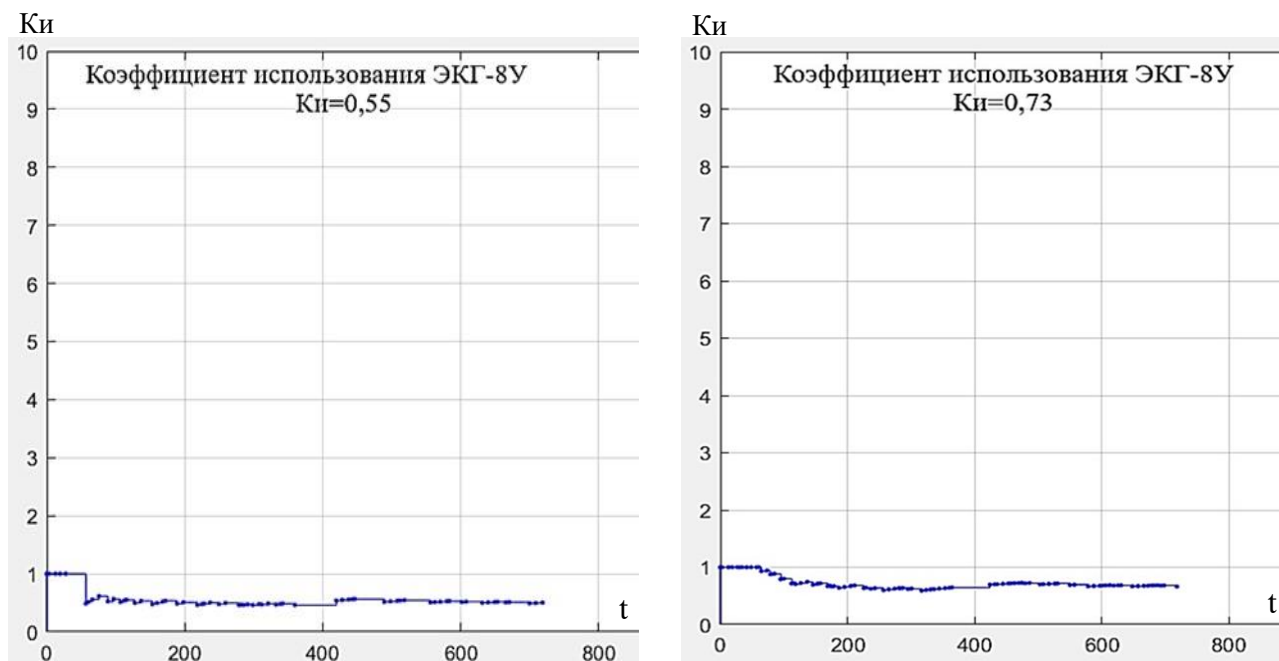


Рис. 3 – Коэффициент использования автосамосвалов до и после проведения оптимизации

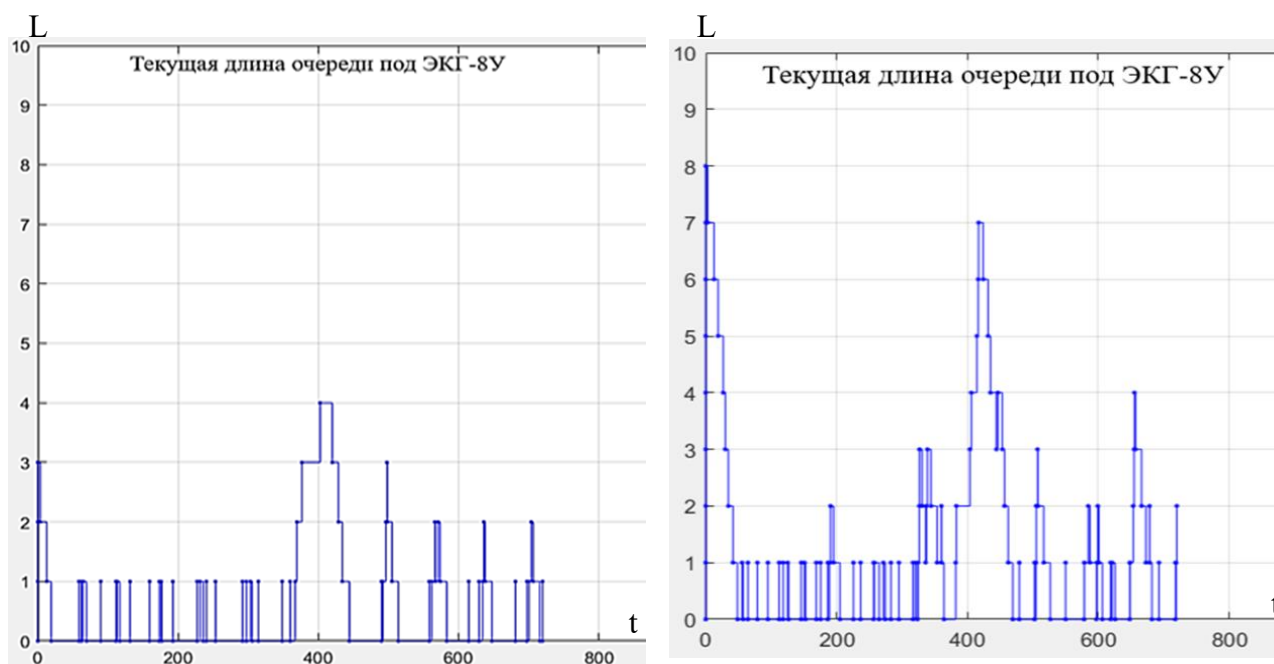


Рис. 4 – Текущая длина очереди автосамосвалов до и после проведения оптимизации

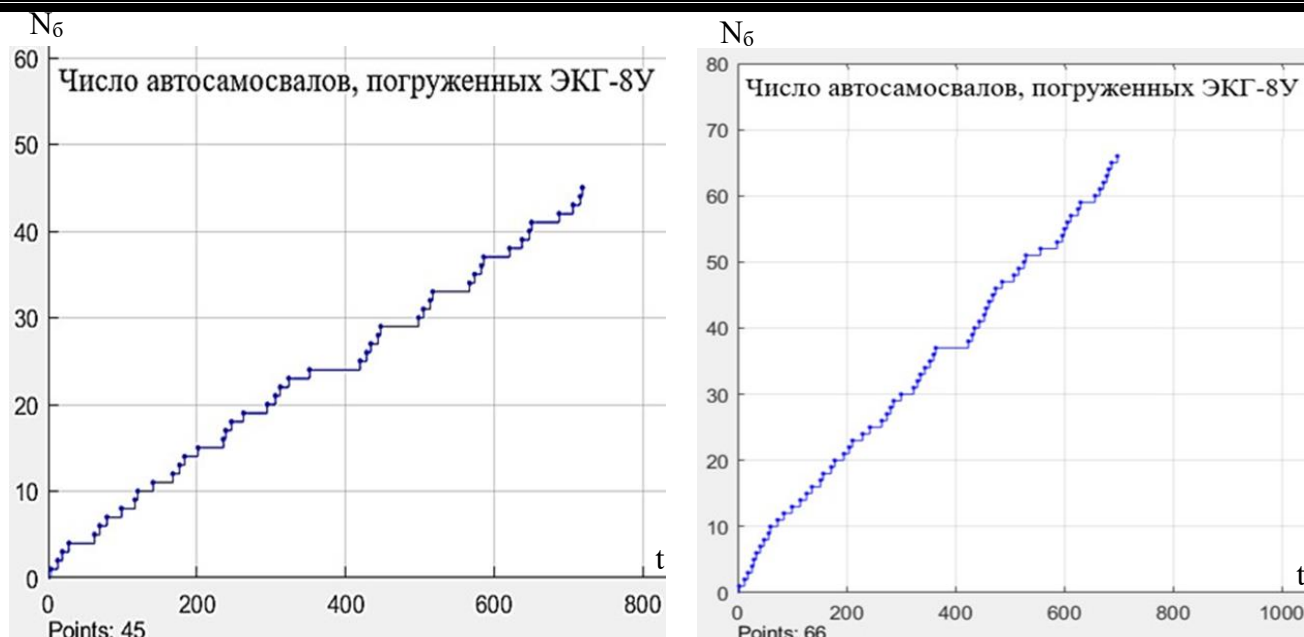


Рис. 5 – Число автосамосвалов, погруженных экскаватором в течение смены до и после проведения оптимизации

Объемы после оптимизации представлены на рисунке 6.

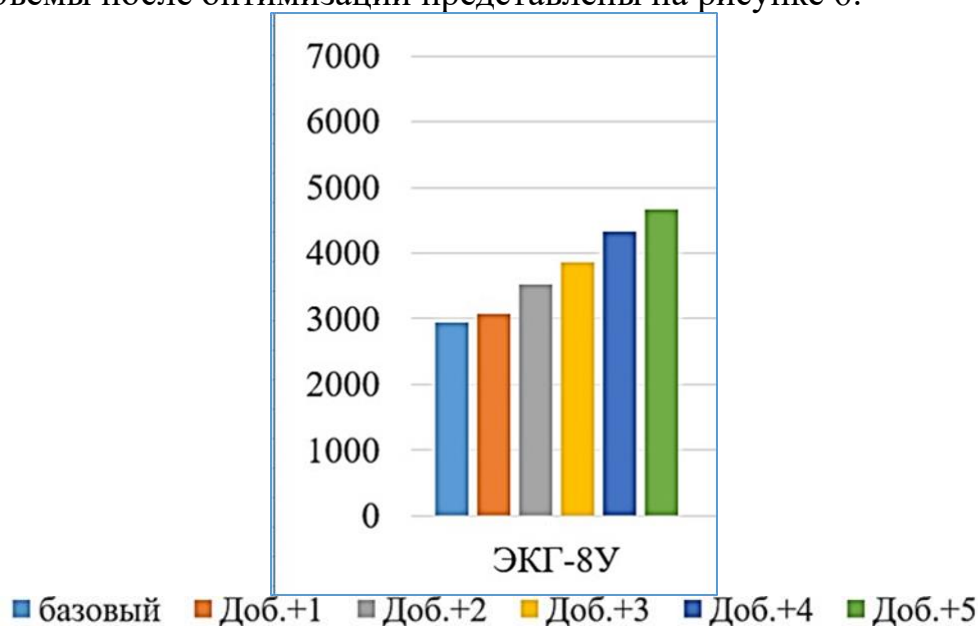


Рис. 6 – Объемы отгруженной массы за одну смену после оптимизации

Данные получены путем добавления по одному автосамосвалу. С увеличением количества автосамосвалов в системе наблюдается рост общего объема отгруженной массы. Это прямое следствие увеличения общего парка транспортных средств, участвующих в перевозочном процессе. Каждый дополнительный автосамосвал, при условии адекватной пропускной способности погрузочного оборудования и маршрутов, способен совершить большее количество рейсов, тем самым увеличивая суммарный объем горной массы. Рост объемов в процентах представлены в таблице 1.

Табл. 1 – Результат роста объемов при добавлении автосамосвалов

ЭКГ-8У	Количество автосамосвалов к базовой модели, ед.				
	+1	+2	+3	+4	+5
Объемы добавленных автосамосвалов	3068	3516,5	3867,5	4322,5	4667
% увеличения	4,42	19,7	31,64	47,12	58,85

Сравнивая базовый и оптимизированный вариант, мы видим, что растет длина очереди и увеличивается число раз в течение смены, следовательно, растут простои. График зависимости числа раз возникновения очереди от её длины в течение смены для экскаватора представлены на рисунке 7.

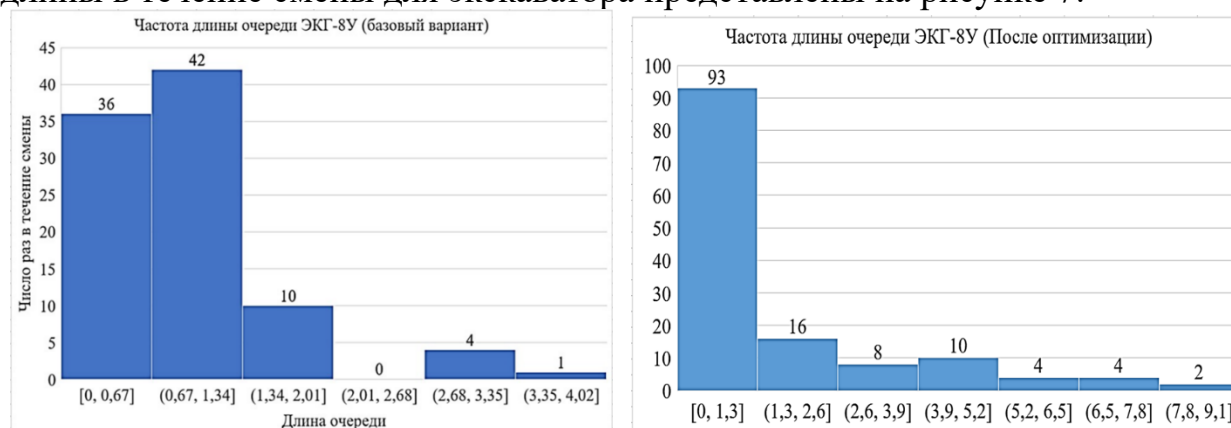


Рис. 7 – График зависимости числа возникновения очередей от длины очереди в течение смены для ЭКГ-8У до и после оптимизации

Сравнительный анализ данных показывает, что при добавлении автосамосвалов производительность возрастает, при этом увеличивается длина очереди. Каждая минута простоя влечёт дополнительные финансовые затраты. Следовательно, прибыль от увеличения объёмов отгрузки должна превышать расходы на добычу.

Список литературы

1. **Голицын М.В.** Первая публикация: Большая российская энциклопедия, 2010 / Кузнецкий угольный бассейн. – Актуализация: 2024. – URL: <https://bigenc.ru/c/kuznetskii-ugol-nyi-bassein-6ad2ce>
2. **Рутковский Б.Т., Рутковский В.Б., Белов В.И., Ушаков А.Г.** Перспективы развития блокового способа открытой разработки угольных месторождений Кузбасса и особенности их горно-геометрического исследования. Межвуз. сб. научн. тр. / Кузбасс. политехн. ин-т. Кемерово, 1973.
3. **Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н., Тайлаков В.О., Соколов С.В.** Перспективы использования метана угольных пластов // Транспорт на альтернативном топливе, Москва: Принт-Лидер, 2013. - №2 – С. 12 – 14.

4. **Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н., Смыслов А.И., Уткаев Е.А.** Переработка дегазационного метана в энергетических установках на угледобывающих предприятиях // Горный Информационно-аналитический бюллетень, Москва: Издательство «ГОРНАЯ КНИГА», 2013. – Отдельный выпуск № 6 – С. 170 – 176.
5. **Файзутдинов Р.Н.** Лабораторный практикум. Математическое моделирование сложных систем / – Казань, 2013. – 69 с.
6. Имитационное моделирование экономических процессов. Разработка имитационных моделей средствами пакета SIMULINK: учебно-методическое пособие / А.К. Розенцвайг, Р.Ш. Шарипов – Набережные Челны: Издательство Набережночелнинского института КФУ, 2019. – 43 с.
7. Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева: официальный сайт. – Кемерово. – URL: <https://kuzstu.ru/departament/chistii-ugol-zelenii-kuzbass/razrabotka-i-sozdanie-bespilotnogo/>
8. Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева: официальный сайт. – Кемерово. – URL: <https://kuzstu.ru/news/5259/uchenye-kuzgtu-gotovy-vooruzhit-shahtu-cifrovym-intellektom/>