

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТИРОВКИ РУДЫ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА В СИСТЕМЕ BPSIM

**И.В. Степанова, А.Н. Ивановская, Е.К. Аксенова, А.А. Шеклеин, А.Р. Галоян, А.Г. Минасян
(Екатеринбург)**

Вопросам разработки проблемно-ориентированных систем поддержки принятия решений (СППР) и применению геоинформационных систем при проектировании и планировании горных работ на карьерах посвящены работы Аленичева В.М. и Суханова В.И. [1-2], а также [3-4]. Опыт применения дискретно-событийного имитационного моделирования GPSS к горно-обогатительного производства представлен в работе [5], моделирования организации рудопотока и управления затратами горнорудного предприятия в [6]. Применение системы имитационного моделирования AnyLogic для задачи анализа горной добычи в подземном калийном руднике представлено в [7]. Мультиагентный подход применялся в задаче оптимизации решений в многоагентной системе повышения качества железорудного агломерата [8] и задачах проектирования и предпроектного анализа шахтных робототехнических систем [9].

Для задачи моделирования участка добычи и транспортировки руды горно-обогатительного комбината (ГОКа) взяты данные Лебединского ГОКа, находящиеся в открытых источниках. В задаче рассматривается добыча и транспортировка полезных ископаемых до обогатительной фабрики.

В настоящее время разработано много гибридных моделей мультиагентных динамических процессов, к таким моделям относятся сеть потребностей и возможностей Скобелева П.О. и Виттиха В.А. [10], гибридный подход Борщева А.В., реализованный в системе AnyLogic [11]. В данной работе для моделирования горно-обогатительного производства используется модель мультиагентного процесса преобразования ресурсов (МППР) и ее программная реализация в виде системы динамического моделирования ситуаций BPsim.MAS [12, 16] и метод анализа узких мест [13]. Вопросам разработки проблемно-ориентированных систем поддержки принятия решений (СППР) при проектировании и планировании горных работ на карьерах посвящены работы [5-6, 15].

Методика эксперимента

Для расчетов сетей массового обслуживания (СМО) используется теория вероятностных сетей, которая основывается на Марковских и полумарковских процессах. Поиск узких мест в сети является важным аспектом анализа ее работы. Узкое место создается тем узлом сети, у которого коэффициент загрузки U_k приближается к единице. С точки зрения применения операционного анализа вероятностных сетей к модели МППР при анализе и устранении узких мест необходимо анализировать следующие параметры: 1) коэффициент использования узла (узлам соответствуют операции и агенты, также необходимо анализировать коэффициент использования средства); 2) среднюю длительность нахождения заявки в очереди к операции, агенту (размер очереди заявок к операции, среднюю очередь заявок к правилу агента); 3) коэффициент посещаемости узла и среднюю длительность обработки требования в узле. Аналогично оценке очереди проводится оценка среднего состояния ресурсов (как входных, так и выходных по отношению к определенной операции или правилу агента).

Объекты исследований

Объектом исследования является процесс транспортировки руды на Лебединском горно-обогатительном комбинате (ГОК). При разработке Лебединского месторождения железистых кварцитов принят комбинированный вид транспорта: железнодорожный транспорт в сочетании с грузовым автотранспортом. Это обусловлено большой глубиной разработки и большой протяженностью уступов.

Транспортирование осуществляется: из забоя до перегрузочных площадок - автомобильным, от перегрузочных площадок до отвалов железнодорожным транспортом. Расстояние транспортирования от карьера до обогатительной фабрики - 14 км, для составов.

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

Железнодорожный транспорт - 25 составов, состоящих из: 25 электровозов, 50 мотор-вагонов, 225 думпкара. В качестве тягового средства железнодорожного транспорта используется агрегат ОПЭ-2, состоящий из электровоза управления со сцепным весом 120 т и двух моторных думпкаров 5ВС-60. Агрегат работает на переменном токе, напряжением 10 кВ, в качестве транспортных сосудов принимаем думпкары 2ВС-105. Для вывозки руды железнодорожным транспортом предусматриваем наличие перегрузочных площадок, расположенных в карьере. Два железнодорожных состава одновременно могут находиться на погрузке, после этого они последовательно отправляются на пункт разгрузки. Всего функционирует 12 составов. В одном составе один электровоз, 9 думпкаров 2ВС-105 и 2 мотор-вагона. В мотор-вагоны входит 33 тонны руды, а в думпкар – 90 тонны. Общий вес груженого состава: 876 тонны. Для транспортирования горной массы от забоя до перегрузочной площадки предусматриваем автомобильный транспорт - автосамосвалы БелАЗ-7519 грузоподъемностью 110 тонн. Количество БелАЗов составляет 50 единиц. Длина транспортирования автотранспортом - 1,2 км. Для загрузки руды в авто- и железнодорожный транспорт предусмотрено наличие экскаваторов на добыче и перегрузке в количестве 9 шт.

Затраченное время на совершения каждого этапа транспортировки руды из забоя до отвалов представлено в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные

Наименование	Значение
Железнодорожный транспорт	
Общее время погрузки состава	34 мин
Время движения груженого состава	45 мин
Время разгрузки состава	39 мин
Время движения порожнего состава	37 мин
Автомобильный транспорт	
Время погрузки	4,33 мин
Время движения груженого автомобиля	7,92 мин
Время движения порожнего автомобиля	3,96 мин
Время разгрузки	1,5 мин

Моделирование

Процесс начинается с добычи руды, после руда перегружается в БелАЗы, затем БелАЗы перевозят руду до железнодорожных составов и возвращаются на место погрузки руды, следующим этапом идет погрузка руды в железнодорожные составы, транспортировка ее на перерабатывающий завод и возврат железнодорожных составов на место погрузки. Исходя из описанной структуры были выделены три этапа процесса: 1) добыча; 2) транспортировка руды БелАЗами; 3) транспортировка руды составами. Второй и третий этапы имеют схожие ключевые точки: погрузка руды в транспорт, транспортировка руды и возврат транспорта на погрузку. На основе этапов и ключевых точек была составлена схема транспортировки, которая представлена на рисунке 1.

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

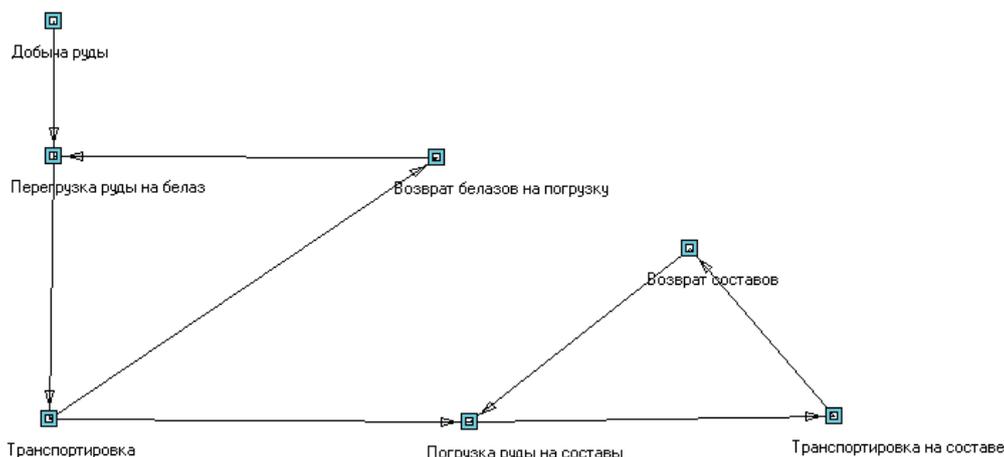


Рис. 1. Схема транспортировки руды на Лебединском ГОКе в СИМ BPSim

Каждый процесс схемы был декомпозирован в соответствии с количеством главного транспорта: БелАЗов и составов. Под процессы были наделены теми свойствами и параметрами, которые были обусловлены в исходных данных: было указано количество используемых экскаваторов (на этапах погрузки), затраченное время на выполнение операции.

Также для выявления узких мест при моделировании были введены следующие ресурсы:

информационные ресурсы - очередь БелАЗов на погрузку руды в забое, разгрузку на перегрузочные площадки и возврат на забой, очередь железнодорожных составов на погрузку на перегрузочных площадках, разгрузку и транспортировку обратно на погрузку;

материальные ресурсы - общее количество добытой руды, количество руды на транспортировке БелАЗами, количество руды перед погрузкой в железнодорожные составы и количество перевезенной руды на ГОКе.

В результате в каждом блоке модели были заданы исходные параметры. Например, на этапе «Перегрузка в БелАЗы» задействованы экскаватор на погрузку, который описан как используемое средство; учтены использование и изменение следующих ресурсов: количество руды для погрузки, количество руды на транспортировке БелАЗам, а также к количеству транспорта на очереди на транспортировку; указано затраченное время на погрузку (см. рис. 2).

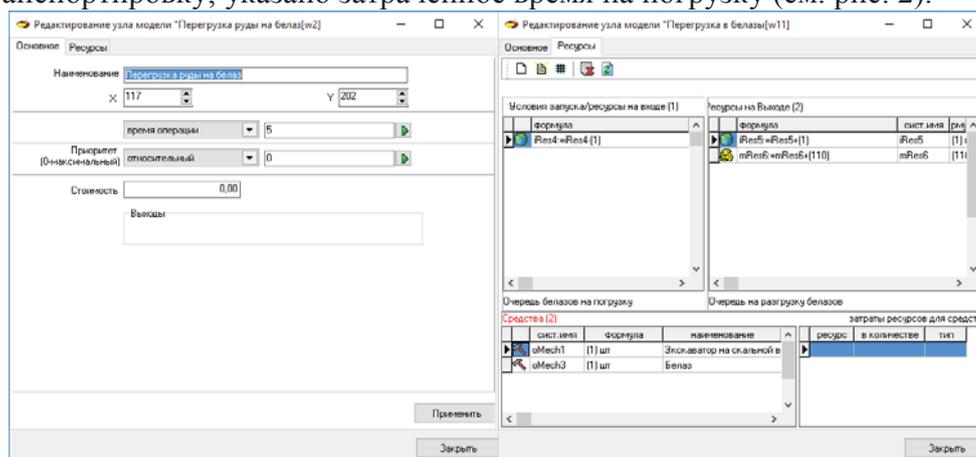


Рис. 2. Блок «Перегрузка руды на БелАЗ»

В разработанную модель были добавлены управляющие элементы для регулирования входных данных и аналитические элементы для мониторинга изменения значений очередей. Общий вид имитационной модели представлен на рисунке 3.

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

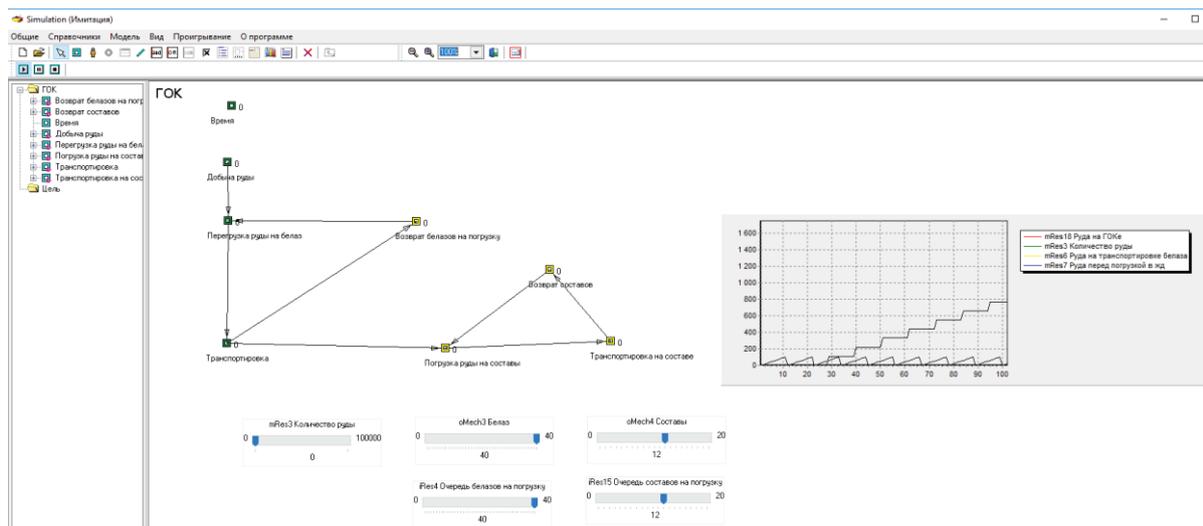


Рис. 3. Модель в СИМ BPSim с элементами управления ресурсами

Эксперименты

При добыче пород скальной вскрыши большую роль играет организация транспортировки руды от места добычи до завода по переработке. Для транспортировки ГОК использует два вида транспорта: автомобильный и железнодорожный. Оба этих транспорта могут представлять проблемы при организации логистики. Количество составов и транспортных средств в задаче является ключевыми параметрами, с помощью их варьирования и диагностики узких мест - очередей на загрузку и транспортировку. Общие данные для экспериментов: моделируется смена 8 рабочих часов. Основные результаты экспериментов сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Основные результаты экспериментов

Составы	БелАЗ	Мин. очередь БелАЗ	U_k БелАЗ	Средняя очередь БелАЗ	Мин. очередь ж/д составов	U_k ж/д составов	Средняя очередь ж/д составов	Руда на погрузку для ж/д составов, т	Итоговая добыча, т
25	50	10	69%	14,56	0	86%	2,8	34263	26190
25	40	1	86%	4,99	0	86%	2,8	34263	26190
32	38	1	87%	4,13	1	76%	6,03	29462	30555
29	37	0	88%	3,76	0	83%	3,89	29462	29682

Наихудшие результаты показал эксперимент со следующими входными данными: 50 БелАЗов и 25 составов, наилучший: 37 БелАЗов и 29 железнодорожных составов. В ходе построения модели и проведения экспериментов были выявлены следующие узкие места: погрузка руды на БелАЗы и перегрузка руды в составы. Для устранения данных узких мест предлагается добавить используемые средства: увеличить количество экскаваторов для погрузки в БелАЗы и в составы до 17 единиц.

Заключение

Разработана имитационная модель процессов добычи и транспортировки Лебединского ГОКа с целью диагностики узких мест. В результате проведенных имитационных экспериментов диагностированы узкие места процессов и выработаны рекомендации по их устранению. В части модели процессов логистики выработаны рекомендации по распределению железнодорожных составов (29 составов) и автотранспорта (37 БелАЗов), а также увеличению количества экскаваторов на погрузку руды в транспорт до 17 единиц техники.

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

Литература

1. Аленичев В.М., Хохряков В.С., Суханов В.И. Моделирование природно-сырьевых технологических комплексов (горное производство). Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 273 с.
2. Аленичев В.М., Суханов В.И. Концепция формирования карьерного пространства использованием информационной технологии // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2005. - № 9.
3. Sokolov I.V., Antipin Yu.G. Systematization and economic-mathematical modeling the development of underground reserves by combined deposits mining // EURASIAN MINING. - 2012. - № 1 - P. 29–32.
4. Yendiyarov S., Zobnin B., Petrushenko S. Expert system for sintering process control based on the information about solid-fuel flow composition // Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, France, Issue 68, August 2012, pp. 861-868 (SCOPUS).
5. Горошков В.Ю., Девятков В.В., Нифантьев Е., Федотов М.В. Имитационное моделирование горно-обогатительного производства // Материалы шестой Всероссийской научн.-практ. конф. «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД 2013): сборник докладов. Казань: Академия наук РТ, 2013. Т.2. С.95-99. <http://simulation.su/files/immod2013/material/immod-2013-2-95-99.pdf>
6. Панасюк Иван Петрович. Имитационное моделирование организации рудопотока и управления затратами горнорудного предприятия: Автореферат диссертации к.э.н. 08.00.13. Санкт-Петербург. 2005.
7. В.Е. Черненко, А.А. Мальханов, Дискретно-событийное моделирование горной добычи в подземном калийном руднике // ИММОД-2013. <https://www.anylogic.ru/resources/articles/modelirovanie-gornoy-dobychi-v-podzemnom-kaliynom-rudnike/>
8. Ендияров, С. В. Оптимизация решений в многоагентной системе повышения качества железорудного агломерата // Сталь. - 2013. - № 9. - С. 12-14.
9. Конюх В.Л., Тайлаков О.В. Предпроектный анализ шахтных робототехнических систем. Новосибирск: Наука. 1991. - 182 с.
10. V. A. Wittich, P. O. Skobelev, "Multi-agent interaction models for the design of the nets of requirements and capabilities in open systems," *Automatics and telemechanics*, vol. 1, 2003, pp. 177-185.
11. AnyLogic simulation software. <https://www.anylogic.com/>
12. Anna Antonova ; Konstantin Aksyonov. A Method of Planning Experiments for Simulation-Evolutionary Modeling and Improvement of the Multiagent Resource Conversion Processes. 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT 2019). Yekaterinburg; Russian Federation; Date of Conference: 25-26 April 2019, Code 148843. Page(s): 217 - 220. DOI: 10.1109/USBREIT.2019.8736659
13. Aksyonov K., Antonova A., Wang Kai, Aksyonova O. Rules for construction of simulation models for production processes optimization. 3rd International Workshop on Radio Electronics and Information Technologies, REIT-Spring 2018; Institute of Radioelectronics and Information Technologies of Ural Federal University Yekaterinburg; Russian Federation; 14 March 2018; Code 135280. CEUR Workshop Proceedings Volume 2076, 2018, Pages 9-18.
14. Разработка Лебединского месторождения железных руд Курской магнитной аномалии методом экскаваторного отвалообразования на отвалах скальной вскрыши. Режим доступа на 9.05.19: <https://knowledge.allbest.ru/geology/3c0a65625a2ad69b4c43b89521316d27.html>
15. Yaroslav Kuznetsov, Konstantin Aksyonov. Research and Development of Hybrid Simulation Models of Mining Complexes. 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT 2019). Yekaterinburg; Russian Federation; Date of Conference: 25-26 April 2019, Page(s): 260 - 263. DOI: 10.1109/USBREIT.2019.8736625
16. Kondratyev A., Aksyonov K., Buravova N., Aksyonova O. Simulation modeling as a service for intelligent systems. 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). 7-8 May 2018. Yekaterinburg, Russia. Page(s): 208-211. DOI: 10.1109/USBREIT.2018.8384586.