

УДК 519.7:56.02

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Казеев Игорь Михайлович,

канд. техн. наук, доцент кафедры информационных систем,

e-mail: ikazeev@miiv.ru,

Московский университет им. С.Ю. Витте, г. Москва

В статье рассмотрены вопросы оптимизации системы транспортной логистики, исследуемые методами статистического моделирования. Цель проводимых на предложенной имитационной модели исследований состояла в получении «выходных» количественных характеристик процесса при изменении «входных» параметров. В результате проведенных на модели экспериментов получена информация о поведении системы, особенно важная на этапе ее проектирования: даны оценки эффективности алгоритмов управления системой и характера влияния изменения различных входных параметров на выходные параметры системы. Предложены алгоритмы и модели, использующие оценки производительности транспортно-технологического комплекса для оценки суммарных потерь от простоев транспорта в очередях на обслуживание при изменении входных параметров системы транспортной логистики. Рассмотрено применение метода динамического программирования для разработки вычислительного способа оптимального распределения транспортных средств по пунктам погрузки. На конкретном примере рассмотрена эффективность применения предлагаемого подхода имитационного моделирования для управления системой транспортной логистики.

Ключевые слова: имитационное моделирование, оптимизация логистики, алгоритм, оперативное управление

SIMULATION MODELING TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL COMPLEX

Kazeev I.M.,

candidate of technical sciences, associate professor department of information systems,

e-mail: ikazeev@miiv.ru,

Moscow Witte University, Moscow

The article deals with the optimization of the transport logistics system, investigated by statistical modeling methods. The purpose of the research conducted on the proposed simulation model was to obtain “output” quantitative characteristics of the process when changing the “input” parameters. As a result of model experiments provided information on the behavior of the system, particularly important at the design stage: estimation of efficiency of algorithms of the control system and the nature of the impact of changes in different input parameters on the output parameters of the system. Algorithms and models are proposed that use estimates of the performance of the transport and technological complex to estimate the total losses from transport downtime in queues for service when changing the input parameters of the transport logistics system. The application of the dynamic programming method to develop a computational method for optimal distribution of vehicles by loading points is considered. Using a specific example, we consider the effectiveness of the proposed simulation approach for managing the transport logistics system.

Keywords: simulation modelling, logistics optimization, algorithms, operative management

DOI 10.21777/2500-2112-2020-1-69-74

Введение

Имитационное моделирование – наиболее эффективный и практически доступный метод исследования систем, получения информации о поведении системы, особенно на этапе ее проектирования: оценки вариантов структуры системы, эффективности различных алгоритмов управления системой, влияния изменения различных параметров системы. Имитационное моделирование может быть положено в основу структурного, алгоритмического и параметрического синтеза систем, когда требуется создать систему с заданными характеристиками при определенных ограничениях [1; 8; 9].

Рассмотрим использование результатов имитационного моделирования применительно к задачам оперативного планирования горных работ (например, погрузка руды или породы в карьере, ее доставка и разгрузка на складе, на обогатительной фабрике или в отвалы пустой породы, возвращение автотранспорта порожняком до карьера), решаемых в реальном времени [7].

Чрезвычайно большое значение имеют критерии, на основе которых осуществляется оперативное планирование [2; 6]. Выделим два из них, сформулировав в общем виде: «максимизация объема вывозимого груза при соблюдении заданных показателей качественного состава горной массы и выполнении условий технологии» или «минимизация суммарных потерь от простоев транспорта и погрузочного оборудования при соблюдении заданных показателей качественного состава горной массы и выполнении условий технологии» [5].

1. Постановка распределительной задачи

Рассмотрим использование оптимальных методов решения распределительной задачи по второму критерию: в этой задаче требуется найти такой вектор прикрепления автотранспорта $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_M)$, чтобы целевая функция, заданная функционалом F – условием (1), принимала минимальное значение при выполнении ограничений на число имеющихся транспортных средств N и количество перевозимого продукта (2):

$$F = \sum_{i=1}^M T_i(\vec{x})C_i + \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^L T_j^p(\vec{x})C_p \rightarrow \min, \quad (1)$$

где: i – номера пунктов погрузки; j – номера автотранспортных единиц;

C_i – стоимость простоя i -го погрузочного пункта в единицу времени;

C_p – стоимость простоя j -го транспортного средства p -го типа в единицу времени;

N – общее количество транспорта, работающего в смене одновременно;

M – общее количество погрузочных пунктов;

$T_i(\vec{x}), T_j^p(\vec{x})$ – время простоев соответственно i -го пункта погрузки и j -го транспортного средства p -го типа при выполнении ограничений на вывоз груза от i -го пункта погрузки в k -й пункт разгрузки:

$$Q_i^{\min} \leq \sum_{k=1}^R Q_{ik}(\vec{x}) \leq Q_i^{\max}, \quad (2)$$

где $Q_i^{\min}, (Q_i^{\max})$ – минимально (максимально) допустимый объем вывоза груза из i -го пункта погрузки;

k – номер пункта разгрузки;

$Q_{ik}(\vec{x})$ – объем вывоза груза из i -го пункта погрузки в пункт разгрузки k при принятом варианте \vec{X} закрепления транспорта за пунктами погрузки.

На статистической модели погрузочно-транспортного процесса исследовалась задача планирования горных работ (распределения транспорта по алгоритму фиксированного прикрепления) [3]. Для практического решения этой задачи необходимо было установить меру реальной производительности погрузочного пункта и автотранспорта и улучшить показатели их совместной работы путем применения формализованных методов распределения транспортных средств к пунктам обслуживания [10].

В такой постановке задача оперативного планирования сводится, по сути, к задаче планирования погрузочно-транспортных работ. При оперативном планировании зачастую используется традицион-

ный подход, опирающийся на применение методики средних показателей, что не может обеспечить высоких результатов. Хронометражными наблюдениями установлено, что отклонения фактической продолжительности погрузки транспорта от нормативной для различных погрузчиков достигают 80 %, и это является одной из причин неравномерной обеспеченности погрузочных средств транспортом.

Для исследования и оптимизации работы погрузочно-транспортного оборудования по критерию минимизации потерь создана статистическая имитационная модель работы транспорта в карьере [7]. Имитационное моделирование работы транспортно-технологического комплекса использовано для решения двух основных задач:

- определения показателей работы карьера при некотором фиксированном распределении автотранспорта (с возможным директивным перераспределением его в течение смены);
- минимизации удельных суммарных потерь от простоев погрузочного и транспортного оборудования.

Данная модель учитывает число и типы прибывшего на смену автотранспорта, число и расстановку действующих погрузчиков (экскаваторов), а также их приоритеты, задаваемые в соответствии с технологическим графиком ведения работ. В модель закладываются также показатели моделируемой транспортной системы (значения расстояний транспортировки, средние скорости движения автотранспорта на различных маршрутах в условиях данного карьера и т.п.). На основе результатов моделирования работы карьера в течение ряда смен можно составить недельные и месячные планы. При этом учитывается статистический характер многих факторов (число выходящего в смену автотранспорта, число действующих погрузчиков (экскаваторов), выходы из строя и ремонты экскаваторов и автотранспорта, состояние дорог и т.д.).

Имитационная модель включает в себя подмодели: пунктов погрузки; транспортировки массы; пунктов разгрузки; движения пустого автотранспорта к пунктам погрузки.

Автотранспорт представлен в модели динамическими объектами (транзактами), которые хранят характеристики соответствующих транспортных средств, закрепленных экскаваторов, маршрутов транспортировки и другие исходные данные, описывающие работу карьерного и транспортного оборудования.

2. Исследование характеристик транспортно-технологического комплекса

В процессе моделирования определяются статистические характеристики погрузочно-транспортного процесса:

- коэффициенты использования (и простоя) автотранспорта и экскаваторов;
- очереди в пунктах погрузки и время ожидания; объемы перевезенной горной массы по каждому экскаватору и автотранспорту, а также по каждому их типу;
- значение целевой функции F в формуле (1) (удельных суммарных потерь от простоев погрузочного и транспортного оборудования).

Перечисленные характеристики оцениваются при решении задачи анализа работы карьера при управлении по алгоритму фиксированного закрепления автотранспорта [4].

Имитационная модель прошла проверку на ряде транспортно-технологических комплексов нескольких крупных горно-обогатительных предприятий с автомобильным транспортом. В результате проведенных на имитационной модели карьера исследований были получены необходимые для решения задачи распределения транспорта по пунктам погрузки и разгрузки показатели погрузочно-транспортного процесса. Недостатком этой имитационной модели является сложность ее применения в режиме реального времени. Поэтому накапливаемая при моделировании статистика аппроксимирована аналитическими выражениями и использовалась при решении распределительной задачи, т.е. статистическая модель преобразовывалась в аналитическую модель распределения ресурсов [7].

3. Модель оптимизации распределения транспортных средств и результаты моделирования

На базе метода динамического программирования был разработан вычислительный способ оптимального распределения транспортных средств, приводящий к нахождению глобального минимума

(максимума) оптимизируемой функции любого характера. Разработанный способ требует меньше вычислительных операций (для наиболее распространенных, т.е. типовых ситуаций) по сравнению с полным перебором [3].

Другим подходом к решению поставленной задачи является применение разработанного вычислительного способа оптимального распределения транспортных средств, применяемого в случае выпуклости (вогнутости) оптимизируемой функции. В таком случае, задача минимизации функционала (1) решается методом дихотомии (в случае унимодальной целевой функции) или методом проб (при небольшом числе вариантов закрепления автотранспорта) путем многократных прогонов модели для испытываемых вариантов закрепления. Этот способ приводит к уменьшению объема вычислительных операций более чем в 2 раза по сравнению с первым универсальным способом.

Моделирование позволило получить наилучшие, в смысле критерия (1), соотношения количества автотранспортных единиц разной грузоподъемности, закрепленных за каждым погрузочным пунктом, в зависимости от наличного их числа, номеров работающих погрузчиков и расстояний транспортировки.

Рассмотрим результаты моделирования на примере исследования работы карьера с несколькими пунктами погрузки и изменяющимся от 4 до 36 общим количеством автотранспортных единиц на линии (в работе).

На рисунке 1 показаны суммарные потери S от простоев экскаваторов и транспорта на одном из маршрутов (приведенные к одной смене). Суммарные потери зависят как от количества самосвалов N на данном маршруте, так и от общего числа самосвалов в карьере. Кривые на рисунке соответствуют суммарным потерям от простоев экскаваторов и транспорта при фиксированном числе N самосвалов на данном маршруте равном 2, 11, 14. По горизонтальной оси отмечается общее количество самосвалов на линии. Длина указанного маршрута транспортировки фиксированная ($L = 4,3$ км).

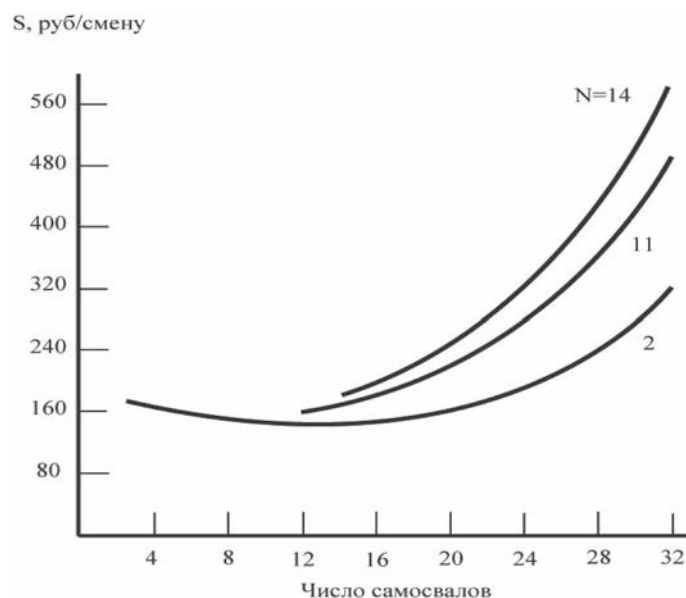


Рисунок 1 – Суммарные потери от простоев погрузочных средств и транспорта (тыс. руб.) от общего числа самосвалов в карьере

Для оценки эффективности применения предложенной имитационной модели фактически полученные показатели работы карьера сопоставлялись с показателями, полученными по результатам моделирования. Суммарные потери от простоев экскаваторов и транспорта могут быть снижены при оптимальном их распределении.

Заключение

Результаты исследования транспортного процесса на имитационной модели и его оптимизация используются при технической реализации автоматизированной системы управления транспортно-технологическими комплексами на открытых горных разработках, а также позволяют получать и изучать различные характеристики технологического процесса для целого класса подобных логистических систем с применением автомобильного или железнодорожного транспорта [4; 11; 12].

Методы статистического моделирования позволяют снять все ограничения, искусственно введенные в аналитическую модель, но они имеют такие недостатки, как трудность получения функциональных зависимостей, точность результатов, большее время реализации. Накопленная при моделировании статистика аппроксимирована аналитическими выражениями и использовалась при решении распределительной задачи, т.е. статистическая модель преобразовывалась в аналитическую модель распределения ресурсов. Исходя из этого, можно рекомендовать в качестве инструментария при дальнейших исследованиях функционирования систем транспортной логистики и управления ими сочетание как имитационного, так и аналитического моделирования.

Список литературы

1. Бусленко Н.П., Шрейдер Ю.А. Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация на цифровых вычислительных машинах (ЦВМ). – М.: Физматгиз, 1961. – 228 с.
2. Казеев А.И. Механизм образования разрушительных глубоких оползней на городских территориях и в горнопромышленных районах // Сергеевские чтения. Эколого-экономический баланс природопользования в горнопромышленных регионах: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии / под ред. В.И. Осипова (2–4 апреля 2019 г.). – Пермь: Пермский гос. нац. исслед. ун-т, 2019. – Вып. 21. – С. 432–438.
3. Казеев И.М. Модели функционирования и оптимизации систем транспортной логистики // Вестник Московской международной академии. – 2018. – № 2. – С. 72–87.
4. Казеев И.М. Модели функционирования и оптимизации транспортно-технологических комплексов // Устойчивое развитие: общество, экология, экономика: материалы XV Международной научной конференции: в 4 ч. Ч. 2 / под ред. А.В. Семенова, Н.Г. Малышева. – М.: изд. ЧОУВО «МУ им. С.Ю. Витте», 2019. – С. 87–96.
5. Казеев И.М., Казеев А.И. Автоматизация транспортной логистики и обеспечения безопасности горных работ // Информационные технологии в науке, образовании и производстве: материалы международной научно-практической конференции / под ред. Ю.С. Руденко, Р.М. Кубовой, В.В. Шамраевой. – М.: изд. ЧОУВО «МУ им. С.Ю. Витте», 2018. – С. 381–395.
6. Казеев И.М., Казеев А.И. Обеспечение безопасности работ и оптимизация логистики на горнодобывающем предприятии // Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата «Геориск-2018»: материалы X Международной научно-практической конференции. – М.: РУДН, 2018. – Т. 2. – С. 57–62.
7. Казеев И.М., Казеева В.И. Имитационное моделирование и оптимизация логистических систем // Научные труды преподавателей Московской академии экономики и права: сборник. – М.: МАЭП, 2014. – Вып. 28. – С. 68–79.
8. Парфенова М.Я. Общесистемный алгоритмический механизм в сфере инновационной деятельности // Инновации и инвестиции. – 2013. – № 2. – С. 53–56.
9. Парфенова М.Я., Маликов С.Н., Литвин Ю.В. Формализация современных механизмов управленческой деятельности. – М.: изд. ЧОУВО «МУ им. С.Ю. Витте», 2015. – 188 с.
10. Чувикова В.В. Взаимодействие информационных, материальных и финансовых потоков при моделировании бизнес-процессов (на примере транспортно-логистической системы доставки грузов) // Новые технологии на транспорте, в энергетике и строительстве: материалы региональной научно-технической конференции молодых ученых, студентов, аспирантов (с международным участием) – Омск, 2010. – С. 53–55.
11. Шамраева В.В., Знобищев С.В. Новые подходы к построению линейных участков транспортной инфраструктуры с использованием BIM-моделирования // BIM-моделирование в задачах строитель-

ства и архитектуры: материалы II Международной научно-практической конференции. – СПб., 2019. – С. 124–129.

12. *Шамраева В.В., Кузовлев Е.Г., Баранник С.В.* Реализация геоинформационных систем в дорожной области как одного из направлений информационного моделирования // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2018. – № 6 (168). – С. 20–26.

References

1. *Buslenko N.P., Shrejder Yu.A.* Metod statisticheskikh ispytaniy (Monte-Karlo) i ego realizaciya na cifrovyyh vychislitel'nyh mashinah (CVM). – М.: Fizmatgiz, 1961. – 228 s.
2. *Kazeev A.I.* Mekhanizm obrazovaniya razrushitel'nyh glubokih opolznej na gorodskih territoriyah i v gornopromyshlennyyh rajonah // Sergeevskie chteniya. Ekologo-ekonomicheskij balans prirodopol'zovaniya v gornopromyshlennyyh regionah: materialy godichnoj sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoj geologii i gidrogeologii / pod red. V.I. Osipova (2–4 aprelya 2019 g.). – Perm': Permskij gos. nac. issled. un-t, 2019. – Vyp. 21. – S. 432–438.
3. *Kazeev I.M.* Modeli funkcionirovaniya i optimizacii sistem transportnoj logistiki // Vestnik Moskovskoj mezhdunarodnoj akademii. – 2018. – № 2. – S. 72–87.
4. *Kazeev I.M.* Modeli funkcionirovaniya i optimizacii transportno-tekhnologicheskikh kompleksov // Ustoichivoe razvitie: obshchestvo, ekologiya, ekonomika: materialy XV Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii: v 4 ch. Ch. 2 / pod red. A.V. Semenova, N.G. Malysheva. – М.: izd. CHOUVO «MU im. S.Yu. Vitte», 2019. – S. 87–96.
5. *Kazeev I.M., Kazeev A.I.* Avtomatizaciya transportnoj logistiki i obespecheniya bezopasnosti gornyyh rabot // Informacionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i proizvodstve: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii / pod red. YU.S. Rudenko, R.M. Kubovoj, V.V. Shamraevoj. – М.: izd. CHOUVO «MU im. S.Yu. Vitte», 2018. – S. 381–395.
6. *Kazeev I.M., Kazeev A.I.* Obespechenie bezopasnosti rabot i optimizaciya logistiki na gornodobyvayushchem predpriyatii // Analiz, prognoz i upravlenie prirodnyimi riskami s uchetom global'nogo izmeneniya klimata «Georisk-2018»: materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – М.: RUDN, 2018. – Т. 2. – S. 57–62.
7. *Kazeev I.M., Kazeeva V.I.* Imitacionnoe modelirovanie i optimizaciya logisticheskikh sistem // Nauchnye trudy prepodavatelej Moskovskoj akademii ekonomiki i prava: sbornik. – М.: MAEP, 2014. – Vyp. 28. – S. 68–79.
8. *Parfenova M.Ya.* Obshchesistemnyj algoritmicheskij mekhanizm v sfere innovacionnoj deyatel'nosti // Innovacii i investicii. – 2013. – № 2. – S. 53–56.
9. *Parfenova M.Ya., Malikov S.N., Litvin Yu.V.* Formalizaciya sovremennyh mekhanizmov upravlencheskoj deyatel'nosti. – М.: izd. CHOUVO «MU im. S.Yu. Vitte», 2015. – 188 s.
10. *Chuvikova V.V.* Vzaimodejstvie informacionnyh, material'nyh i finansovyh potokov pri modelirovanii biznes-processov (na primere transportno-logisticheskoy sistemy dostavki gruzov) // Novyye tekhnologii na transporte, v energetike i stroitel'stve: materialy regional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii molodyh uchenyyh, studentov, aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem) – Omsk, 2010. – S. 53–55.
11. *Shamraeva V.V., Znobishchev S.V.* Novyye podhody k postroeniyu linejnyh uchastkov transportnoj infrastruktury s ispol'zovaniem BIM-modelirovaniya // BIM-modelirovanie v zadachah stroitel'stva i arhitektury: materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – SPb., 2019. – S. 124–129.
12. *Shamraeva V.V., Kuzovlev E.G., Barannik S.V.* Realizaciya geoinformacionnyh sistem v dorozhnoj oblasti kak odnogo iz napravlenij informacionnogo modelirovaniya // Vestnik komp'yuternyyh i informacionnyh tekhnologij. – 2018. – № 6 (168). – S. 20–26.