Оригинальная статья

Original Paper

УДК 622.271:528.063 © Р.К. Халкечев✉[1], Ю.М. Левкин[2], К.В. Халкечев[1], 2025

[1] НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия
[2] ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», 107023, г. Москва, Россия
✉ e-mail: syrus@list.ru

UDC 622.271:528.063 © R.K. Khalkechev✉[1], Yu.M. Levkin[2], K.V. Khalkechev[1], 2025

[1] National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation
[2] Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation
✉ e-mail: syrus@list.ru

Алгоритм на случайных графах как основа оптимального размещения ремонтно-технической службы на угольных разрезах с учетом геодезических особенностей

Algorithm on random graphs as a basis for optimal placement of repair and technical services in coal mines by considering geodetic features

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-5-85-87

Производительность горных работ на угольных разрезах во многом зависит от эффективности работы ремонтно-технической службы. Анализ существующих научных работ показывает, что на данный момент при проведении технического обслуживания преимущественно используется превентивный подход. В основе данного подхода лежат различные модели, позволяющие прогнозировать отказы оборудования и потребности в ремонте, тем самым заблаговременно планировать действия по техническому обслуживанию. При этом проблема оптимального размещения пунктов технического обслуживания на угольных разрезах практически не рассматривалась. В представленной статье предложен новый алгоритм определения оптимального размещения ремонтно-технических служб на угольных разрезах согласно минимаксному критерию. Использование разработанного алгоритма в составе математического обеспечения автоматизированных систем управления на угольных разрезах позволит повысить производительность ведения горных работ и снизить затраты на обслуживание техники и оборудования.

Ключевые слова: *алгоритм, минимаксная задача, угольный разрез, случайный граф, ремонтно-техническая служба, горные машины, оборудование, автоматизированная система.*

Для цитирования: Халкечев Р.К., Левкин Ю.М., Халкечев К.В. Алгоритм на случайных графах как основа оптимального размещения ремонтно-технической службы на угольных разрезах с учетом геодезических особенностей // Уголь. 2025;(5):85-87. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-85-87.

ХАЛКЕЧЕВ Р.К.
Доктор техн. наук, профессор кафедры Инфокоммуникационных технологий НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия, e-mail: syrus@list.ru

ЛЕВКИН Ю.М.
Доктор техн. наук, профессор кафедры Промышленного, гражданского и подземного строительства ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», 107023, г. Москва, Россия, e-mail: lev5353@bk.ru

ХАЛКЕЧЕВ К.В.
Доктор физ.-мат. наук, доктор технических наук, профессор кафедры Геологии и маркшейдерского дела НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия, e-mail: h_kemal@mail.ru

Abstract

The productivity of mining operations at coal mines largely depends on the efficiency of the maintenance and technical service. Analysis of existing scientific works shows that, at present, a preventive approach is predominantly used during maintenance. This approach is based on various models that allow predicting equipment failures and repair needs, thereby enabling the planning of maintenance activities in advance. At the same time, the problem of optimal placement of maintenance points at coal mines was practically not considered. This article proposes a new algorithm for determining the optimal placement of maintenance and technical services at coal mines according to the minimax criterion. The use of the developed algorithm as part of the mathematical support in automated control systems at coal mines will increase the productivity of mining operations and reduce the costs of maintaining machinery and equipment.

Keywords

Algorithm, minimax task, coal mine, random graph, maintenance and technical service, mining machinery, equipment, automated system.

For citation

Khalkechev R.K., Levkin Yu.M., Khalkechev K.V. Algorithm on random graphs as a basis for optimal placement of repair and technical services in coal mines by considering geodetic features. *Ugol'*. 2025;(5):85-87. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-85-87.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность и исправность горных машин и оборудования являются основой для обеспечения заданного уровня производительности любого горно-обогатительного комбината (ГОКа). Установлено, что средние затраты на техническое обслуживание оборудования в отрасли колеблются в пределах 20-60% от эксплуатационных расходов и зависят от множества факторов [1]. Именно поэтому правильное планирование деятельности по техническому обслуживанию снижает общие затраты предприятия и увеличивает срок службы горных машин и оборудования.

В связи с развитием технологии цифровых двойников на данный момент при проведении технического обслуживания преимущественно используется превентивный подход [2]. В основе данного подхода лежат различные модели, позволяющие прогнозировать отказы оборудования и потребности в ремонте, тем самым заблаговременно планировать действия по техническому обслуживанию. Анализ научных работ в данном направлении свидетельствует о наличии нескольких подходов к составлению моделей, лежащих в основе превентивного подхода: основанные на данных [3, 4], основанные на знаниях [5, 6] и физически обоснованные [7].

Несмотря на всю значимость данных работ вне зависимости от используемого подхода, проблема оптимального размещения пунктов технического обслуживания на угольных разрезах практически не рассматривалась. В то же время определение оптимального расположения такого пункта позволит оперативно производить ремонтные работы и тем самым существенно сократить расходы на ГОКах.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Любую территорию угольного разреза можно представить в виде графа, представляющего собой совокупность вершин, соответствующих отдельным рабочим зонам (участкам, на которых ведутся активные горные работы), и дуг, представляющих собой внутрикарьерные дороги. Для повышения производительности и снижения затрат любого ГОКа требуется разместить оптимальным способом пункт ремонтно-технической службы – подразделение, отвечающее за техническое обслуживание, ремонт горной техники, транспортного оборудования и других механизмов, используемых на угольных разрезах. В таких случаях критерий оптимальности может состоять в минимизации времени проезда от пункта обслуживания (ремонтно-технической службы) до самой отдаленной рабочей зоны, т.е. в оптимизации «наихудшего варианта». В общем случае, алгоритмы решения подобного рода задач достаточно хорошо изучены и предусматривают построение и анализ классического взвешенного графа на предмет установления пункта обслуживания в соответствии с минимаксным критерием [8]. Однако ввиду различных геодезических особенностей внутрикарьерных дорог (наличие крутых поворотов и уклонов, перепадов высот, участков с неустойчивыми породами и др.) время проезда на таких дорогах не может быть представлено детерминированной величиной. Следовательно, классический, взвешенный граф не может быть использован для описания сети внутрикарьерных дорог. В связи с этим предложим новый алгоритм решения рассматриваемой задачи определения пункта обслуживания согласно минимаксному критерию.

1. Используя маркшейдерскую документацию, построить граф, описывающий сеть внутрикарьерных дорог, связывающую рабочие зоны угольного разреза.

2. Посредством анализа данных о передвижении транспорта аварийно-технической службы по внутрикарьерным дорогам угольного разреза для каждого ребра графа определить вид и характеристические параметры плотности распределения временных расстояний между вершинами.

3. Для каждой вершины графа определить вес v_j, представляющий вероятность потребности данной рабочей зоны в соответствующем обслуживании и ремонте. При определении данного параметра необходимо учесть вероятность возникновения опасных динамических явлений в рабочих зонах. Для этого можно воспользоваться математическими моделями, представленными в работах [9, 10, 11, 12].

4. Провести серию имитационных экспериментов по определению пункта размещения ремонтно-технической службы согласно минимаксному критерию.

4.1. Используя генераторы случайных чисел с параметрами, установленными на шаге 2, получить значения элементов $d(x_i, x_j)$ матрицы расстояний, описывающей временные расстояния между всеми парами вершин в графе.

4.2. Определить вершину, для которой

$$s(x_i) = \min_{x_i \in X}\left[\max_{x_j \in X}\{v_j[d(x_i, x_j) + d(x_j, x_i)]\}\right].$$

Полученная вершина будет являться пунктом, указывающим на оптимальное размещение ремонтно-технической службы угольного разреза для отдельного имитационного эксперимента (соответствующего реализации случайного графа).

5. Проанализировать результаты имитационных экспериментов и установить пункт оптимального размещения ремонтно-технической службы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования предложен новый алгоритм определения оптимального размещения ремонтно-технических служб на угольных разрезах согласно минимаксному критерию. Применение случайного графа в данном алгоритме позволяет учесть геодезические особенности внутрикарьерных дорог – наличие крутых поворотов и уклонов, перепадов высот, участков с неустойчивыми породами и др.

Использование разработанного алгоритма в составе математического обеспечения проектируемых систем управления на угольных разрезах позволит повысить производительность ведения горных работ и снизить затраты на обслуживание техники.

Список литературы • References

1. Sharma N.R., Mishra A.K., Jain S. OEE improvement of mining shovels by survival analysis and linear optimisation as per sustainable development goals. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2022;(36):323-355. DOI: 10.1080/17480930.2022.2044138.
2. Odeyar P., Apel D.B., Hall R., Zon, B., Skrzypkowski K. A Review of Reliability and Fault Analysis Methods for Heavy Equipment and Their Components Used in Mining. *Energies*. 2022;(15):6263. DOI: 10.3390/en15176263.
3. Bektas O., Marshall J., Jones J.A. Comparison of computational prognostic methods for complex systems under dynamic regimes: a review of perspectives. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2019;(27):999-1011. DOI: 10.1007/s11831-019-09339-7.
4. Wen B.C., Xiao M.Q., Wang X.Q., Zhao X., Li J.F., Chen X. Data-driven remaining useful life prediction based on domain adaptation. *Peer J Computer Science*. 2021;(7):e690. DOI: 10.7717/peerj-cs.690.
5. Zhou Q., Yan P., Liu H., Xin Y., Chen Y. Research on a configurable method for fault diagnosis knowledge of machine tools and its application. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018:937-960. DOI: 10.1007/s00170-017-1268-z.
6. Cao Q., Zanni-Merk C., Samet A., Reich C., Beuvron F.D.B.D., Beckmann A., Giannetti C. KSPMI: A Knowledge-Based System for Predictive Maintenance in Industry 4.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022;(74):102281. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102281.
7. Selcuk S. Predictive maintenance, its implementation and latest trends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2017;(231):1670-1679. DOI: 10.1177/0954405415601640.
8. Christofides N. Graph Theory. An Algorithmic Approach. London, Academic Press, 197,. 400 p.
9. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Математическое моделирование неоднородного упругого поля напряжений породного массива кристаллической блочной структуры // Горный журнал. 2016. № 3. С. 200-205. DOI: 10.17580/gzh.2016.03.05.
   Khalkechev R.K., Khalkechev K.V. Mathematical modeling of non-uniform elastic stress field of a rock mass with crystalline block structure. *Gornyj zhurnal*. 2016;(3):200-205. (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2016.03.05.
10. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Применение теории катастроф для математического моделирования оползневого процесса на вогнутых склонах горных территорий // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15. № 3. С. 720-726. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-720-726.
    Khalkechev R.K., Khalkechev K.V. Application of catastrophe theory for mathematical modeling of landslide process on concave slopes of mountain territories. *Ustojchivoe razvitie gornyh territorij*. 2023;15(3):720-726. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-720-726.
11. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Разработка математической модели поверхностного трансляционного оползня с дёрном на прямых склонах горных территорий при выпадении атмосферных осадков // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 1. С. 174-180. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-174-180.
    Khalkechev R.K., Khalkechev K.V. Mathematical model development of a surface translational landslide with a sod on straight slopes of mountain territories during atmospheric precipitation. *Ustojchivoe razvitie gornyh territorij*. 2024;16(1):174-180. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-174-180.
12. Халкечев Р.К. Об одной новой схеме применения метода конечных элементов в горных науках // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 2. С. 612-619. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-612-619.
    Khalkechev R.K. About one new scheme for the application of finite element method in mining sciences. *Ustojchivoe razvitie gornyh territorij*. 2024;16(2):612-619. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-612-619.

Authors Information

Khalkechev R.K. – Doctor of Engineering Science, Professor, Department of Infocommunication Technologies, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: syrus@list.ru

Levkin Yu.M. – Doctor of Engineering Science, Professor of the Department of Industrial, Civil and Underground Construction, Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation, e-mail: lev5353@bk.ru

Khalkechev K.V. – Doctor of Physico-Mathematical Science, Doctor of Engineering Science, Professor of the, Department of Geology and Mine Surveying, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: h_kemal@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.02.2025
Поступила после рецензирования: 16.04.2025
Принята к публикации: 26.04.2025

Paper info

Received February 20, 2025
Reviewed April 16, 2025
Accepted April 26, 2025