

УДК 51-74, 004.023
DOI: 10.18799/24131830/2025/1/4576
Шифр специальности ВАК: 05.13.18

Алгоритмы выбора путей для подключения базовых станций беспроводной связи к центрам питания в шахте

Д.А. Мигов✉, А.Н. Юргенсон

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Россия, г. Новосибирск

✉mdinka@rav.sccc.ru

Аннотация. Актуальность. Необходимым условием функционирования систем безопасности и управления технологическими процессами в шахтах является обеспечение энергоснабжения соответствующих объектов. В статье рассматривается одна из задач проектирования сети электроснабжения в шахте в рамках иерархичного подхода организации структуры сети. В рамках этого подхода к автоматам осветительным шахтным подключаются контроллеры питания, предназначенные для питания базовых станций. Для их подключения к контроллерам питания используется многожильный кабель. Количество таких жил, а также количество таких кабелей, исходящих из контроллера питания, являются параметрами задачи. **Цель.** Рассмотреть задачу выбора маршрутов для подключения базовых станций беспроводной связи в шахте к центрам питания. Предполагается, что в шахте уже размещены базовые станции и автоматы осветительные шахтные, имеющие возможности для подключения к ним определённого числа контроллеров питания. Таким образом, необходимо выбрать места для размещения контроллеров питания и опередить, как по штрекам прокинуть многожильные кабели для подключения всех базовых станций. При этом схема подключения, которая определяется из стоимости используемого кабеля, должна быть оптимальной по стоимости. **Методы.** Для поставленной математической задачи предложено несколько алгоритмов, в том числе жадный алгоритм, основанный на стратегии «иди в ближайший пункт», и метод имитации отжига. **Результаты.** Для решения задачи предложено и протестировано несколько приближённых методов. Количество жил в кабеле для подключения является параметром задачи. Лучшим из рассмотренных алгоритмов стал алгоритм имитации отжига. Однако, если центры питания необходимо тоже разместить, включение в алгоритм перебора также даёт хорошие результаты при подходящем сочетании количества контроллеров питания и возможных мест их размещения. **Практическая значимость.** Предложенные математическая постановка и методы позволяют находить маршруты минимальной стоимости для подключения многожильными кабелями базовых станций беспроводной связи к источникам питания в шахте.

Ключевые слова: сеть электроснабжения в шахте, беспроводная сеть, граф, гиперсеть, задача коммивояжера, метод имитации отжига

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта № 0251-2022-0005 Программы фундаментальных исследований Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

Для цитирования: Мигов Д.А., Юргенсон А.Н. Алгоритмы выбора путей для подключения базовых станций беспроводной связи к центрам питания в шахте // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 1. – С. 160–168. DOI: 10.18799/24131830/2025/1/4576

UDC 004.722
DOI: 10.18799/24131830/2025/1/4576

Path selection algorithms for connecting wireless base stations to power centers in a mine

D.A. Migov✉, A.N. Yurgenson

*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

✉mdinka@rav.sccc.ru

Abstract. Relevance. Necessary condition for the systems of safety and process control functioning in a mine is to provide power supply to the relevant facilities. The paper deals with one of the tasks of designing a power supply network in a mine within the framework of a hierarchical approach to organizing the network structure. Within this approach, power controllers are connected to mine lighting breaker. To supply base stations to power controllers, a multi-core cable is used. The number of such cores, as well as the number of such cables emanating from a power controller, are the parameters of the problem. **Aim.** To consider the problem of choosing routes for connecting base stations of wireless communication in a mine to power centers. It is assumed that base stations and mine lighting breakers are already located in a mine, having the ability to connect a given number of power controllers to them. The connection scheme must be optimal in terms of cost, which is determined by the cost of the cable used. **Methods.** The authors have proposed several algorithms for solving the mathematical problem, including a greedy algorithm, based on the “go to the nearest point” strategy, and a simulated annealing method. **Results.** To solve the problem, several approximate methods were proposed and tested. The number of cores is parameter of the problem. The best of the considered algorithms is the annealing simulation algorithm. However, if power centers need to be placed as well, brute force enumeration in the algorithm also gives good results with an appropriate combination of the number of power controllers and the number of possible locations for their placement. **Practical relevance.** The mathematical problem stated and the mathematical methods make it possible to find minimum cost routes for connecting wireless base stations by multi-core cables to power sources.

Keywords: power network in a mine, wireless network, graph, hypernet, traveling salesman problem, annealing simulation method

Acknowledgements: The study was supported by a project of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the SB RAS 0251-2022-0005.

For citation: Migov D.A., Yurgenson A.N. Path selection algorithms for connecting wireless base stations to power centers in a mine. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 1, pp. 160–168. DOI: 10.18799/24131830/2025/1/4576

Введение

Обеспечение энергоснабжения для многофункциональной системы безопасности и управления технологическими процессами (МСБ и УТП) на горнодобывающих предприятиях является необходимым условием их функционирования [1]. Требования к подобным системам содержатся в федеральных нормах и правилах [2] и госстандартах [3, 4]. Одним из подходов к их построению является использование единой подземной сети передачи данных. В свою очередь, ее работоспособность напрямую зависит от подачи электроэнергии и наличия резервных аккумуляторных источников питания. Как правило, в целях экономии оборудования систем безопасности и систем управления технологическими процессами зачастую имеют общие точки подключения к сети энергоснабжения.

На угольных шахтах используется однолинейная система распределения энергии. Поскольку на опасных производственных объектах должно проходить две независимых линии питания, на каждой шахте имеется две независимые энергоподстанции. К ним подключены различные комплексы горношахтного оборудования (комбайны, насосы, др.) и подземная осветительная сеть. От осветительной сети получает питание и оборудование МСБ и УТП.

Различные аспекты построения и анализа электротехнических и телекоммуникационных сетей в шахтах являются предметом интенсивных исследований [2–5]. Одним из используемых подходов к организации сети энергоснабжения является вы-

страивание её структуры иерархичным способом [6]. К автоматам осветительным шахтным (АОШ) подключают контроллеры питания (КП), которые преобразуют искробезопасное переменное напряжение 127 В в искробезопасное постоянное напряжение 60 В для питания основных элементов системы – базовых станций (БС). Базовые станции, в свою очередь, обеспечивают беспроводную связь на территории шахты [7–11]. Для их подключения к КП используются многожильный кабель, который проходит через несколько БС и запитывает каждую БС через отдельную жилу. Каждый КП имеет ограниченные возможности для подключения БС, поэтому для подключения их всех необходимо использовать некоторое количество контроллеров.

Задача проектирования сети электроснабжения в шахте является комплексной и содержит ряд математических подзадач большой вычислительной сложности. Правила для построения сети энергоснабжения шахты изложены в [5]. В [12] изучается задача точного позиционирования шахтеров с помощью станций беспроводной связи и предложены рекомендации по расстановке таких станций. Не только задачи проектирования актуальны для шахт, также важной проблемой является нахождение оптимальных путей в уже существующих шахтах. В [13, 14] описана задача поиска оптимального пути для робота с помощью генетических алгоритмов (алгоритма муравьиной колонии, метода роя частиц). В [15] для построения пути робота также использованы алгоритмы решения задачи коммивояжера.

В данной статье рассматривается одна из таких подзадач в рамках описанного выше иерархического подхода организации структуры сети. Предполагается, что в шахте уже размещены БС и АОШы, имеющие возможности для подключения к ним определённого числа КП. Таким образом, необходимо выбрать места для размещения КП и определить, как по штрекам прокинуть многожильные кабели для подключения всех БС. При этом схема подключения, которая определяется из стоимости используемого кабеля, должна быть оптимальной по стоимости. В качестве параметров задачи выступает максимально возможное число подключаемых БС на одной линии (т. е. количество жил в кабеле) и максимально возможное число таких подключаемых кабелей к одному КП.

Ниже мы предлагаем несколько подходов к решению данной задачи. Большинство алгоритмов являются улучшенными версиями алгоритмов, ранее опубликованных в [11]. Также проводится численный анализ соответствующих алгоритмов на различных входных данных.

Постановка задачи и подходы к её решению

Рассматриваемую прикладную задачу можно по-разному сформулировать математически. В [6] мы её сформулировали как задачу дискретной оптимизации на графе. В [11] приведена формулировка с использованием аппарата гиперсетей [16]. Ниже мы приводим именно эту формулировку. Отметим, что изложение задачи и методов её решения в терминах гиперсетей не является необходимым, и вполне можно обойтись и более простым аппаратом теории графов. Однако гиперсетевая формулировка является более наглядной, как показано ниже. Также это позволяет в компактной форме учитывать развитие и усложнение данной прикладной задачи, например, учёт надёжности и живучести проектируемых сетей, так как в явном виде будет информация о проходящих через каждый штрек линий связи. Аппарат гиперсетей позволяет также описывать и решать и другие задачи, связан-

ные в том числе и с добычей и транспортировкой георесурсов [9, 17, 18].

Гиперсеть называется объект $HN=(X, V, R, F)$, включающий в себя: $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – множество вершин; $PN=(X, V)$ – граф первичной сети, где $V=(v_1, v_2, \dots, v_g)$ – множество рёбер (ветвей) первичной сети; $WN=(X, R)$ – граф вторичной сети, где $R=(r_1, r_2, \dots, r_m)$ – множество ребер вторичной сети; $F: R \rightarrow 2^V$ – отображение, сопоставляющее каждый элемент $r \in R$ и маршрут из ветвей в графе PN ; $c(v)$ – стоимость ветви $v \in V$ первичной сети.

Стоимость ребер вторичной сети равна сумме стоимостей их ветвей.

Графы первичной и вторичной сетей являются не ориентированными.

На рис. 1 представлен пример первичной сети PN (графа выработок) в виде решетки и вторичной сети WN (графа линий связи в шахте) для описания топологий шахты и коммуникаций в ней. Зелёным цветом отмечены БС, красным – КП.

Постановка задачи:

Пусть задан граф первичной сети $PN=(X, V)$, $A \subseteq X$ – множество «возможных» начальных вершин для ребер (АОШ), $B \subseteq X$ – множество вершин (БС), через которые должны пройти ребра вторичной сети, $A \cap B = \emptyset$. Требуется построить вторичную сеть минимальной стоимости:

$$\sum_{r \in R} c(r) \rightarrow \min,$$

такую, что выполнены следующие ограничения;

- 1) число начальных вершин ребер A' : $|A'| \leq K_A$, где $A' \subseteq A$ (ограничение на количество задействованных КП);
- 2) каждая вершина из A' может быть началом ограниченного числа рёбер вторичной сети, по умолчанию этот параметр равен 2 (т. е. максимальное число многожильных кабелей, которые могут исходить из одного КП), однако предлагаемые алгоритмы работают и с другими его значениями;
- 3) в каждом ребре r должно быть не больше K_B вершин из множества B .

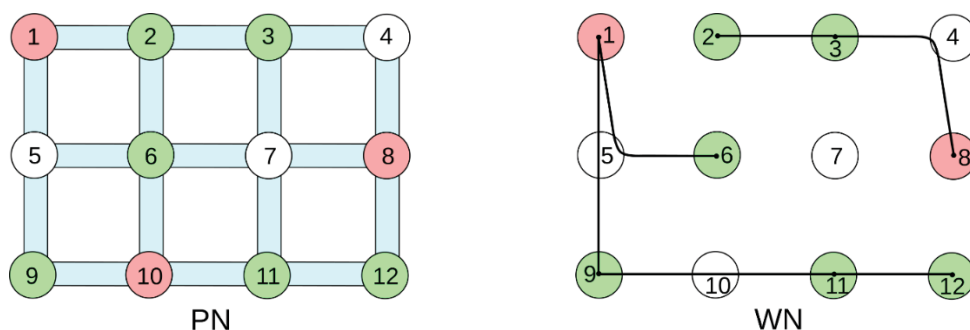


Рис. 1. Пример гиперсети: граф выработок (слева) и граф линий связи в проложенных выработках (справа)
Fig. 1. Example of a hypernet: a graph of mine tunnels (left) and a graph of communication lines in a mine (right)

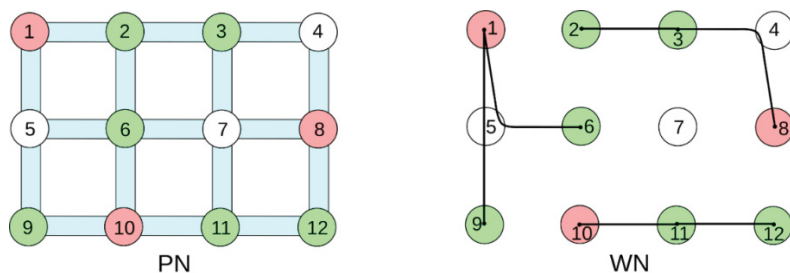


Рис. 2. Пример работы жадного алгоритма для случая, когда длины всех ветвей совпадают
Fig. 2. Example of the greedy algorithm result for the case, when the lengths of all branches are the same

На рис. 2 приведен пример, где множество «возможных» начальных вершин $A = \{1, 8, 10\}$, ограничения $K_A = 2$, $K_B = 3$, в построенной гиперсети множество начальных вершин $A' = \{1, 8\}$.

Без ограничения общности будем считать, что граф первичной сети PS является связным и поставленная задача является разрешимой.

В экспериментах ниже предполагается, что стоимость подключения пропорциональна длине прокладываемого кабеля, т. е. геометрическому расстоянию. В противном случае вместо матрицы расстояний может быть использована матрица стоимости подключения БС с номером i до АОШ с номером j без каких-либо изменений в предлагаемых алгоритмах.

В базовом варианте задачи предполагается, что КП уже размещены и требуется оптимальным образом прокинуть кабели от них для запитывания всех БС. Тогда $A = A'$. В общем же случае в дополнение этой задаче контроллеры питания также необходимо расставить по потенциальным местам размещения, т. е. АОШ.

Другой подход математического описания подобных прикладных задач – это их формулировка в терминах задачи коммивояжера (Travelling salesman problem (TSP)), одной из классических задач теории графов [19, 20], которая является NP-трудной. Для задач коммивояжера используются разные подходы: метод ветвей и границ, жадный алгоритм, биоинспирированные техники, метод имитации отжига [21] и другие, а также комбинации методов, что позволяет за приемлемое время получить решение с заданной погрешностью [22–24].

Рассматриваемая задача может быть сформулирована как задача нескольких коммивояжеров (Multiple TSP), к тому же незамкнутых, в условиях ряда ограничений. Во-первых, наличие нескольких «депо», когда коммивояжеры могут выезжать из одного или нескольких пунктов, такие задачи также изучаются (например, [23]). В нашем случае такие пункты – это набор КП. Во-вторых, ограничение на число пунктов в маршруте (но не на длину маршрута), то есть на количество жил в кабеле. В-третьих, ограничение на число коммивояжеров, выезжающих из одного депо, то есть на количество кабелей, исхо-

дящих из одного КП. В-четвертых, мы также рассматриваем задачу оптимального размещения КП и прокладки кабелей от них к БС. В этом случае цель не только в оптимизации пути каждого коммивояжера в условиях ряда ограничений, но и в оптимизации размещения депо с ограничениями на их расположение, а также на количество депо, которые могут быть размещены в одном пункте, что соответствует возможному числу подключаемых КП к одному АОШ (то есть мощности АОШ). Подобных задач, описанных в литературе, нами найдено не было, поэтому предлагается ряд алгоритмов для их решения.

Алгоритмы основаны на известных подходах, модифицированных и адаптированных для учета указанной выше специфики. Одним из основных подходов для решения задач MTSP является жадный алгоритм, реализующий стратегию «иди в ближайший пункт». Другой популярный подход – метод имитации отжига, имитирующий соответствующий физический процесс [21].

Жадный алгоритм для нахождения путей подключения объектов к центрам питания

Жадный алгоритм основан на принципе «иди в ближайший пункт», далее будем обозначать его как *Nearest*. Данный алгоритм можно использовать лишь в случае, когда $|A| = |A'|$, либо когда множество A' заранее найдено и зафиксировано каким-либо образом. Модификация алгоритма для решения рассматриваемой задачи реализуется тремя шагами:

Шаг 1. Алгоритмом Флойда найти матрицу расстояний для множества вершин $A' \cup B$.

Шаг 2. Среди всех ребер (a, b) $a \in A'$, $b \in B$ найти наименьшее и включить его в путь.

Шаг 3. Среди всех ребер, еще не включенных в пути (x, x') , $x, x' \in A' \cup B$ (причем вершина x уже является крайней в каком-либо пути, либо вершина $x \in A'$, из которой еще выходил ни один путь) найти наименьшее (по стоимости) ребро и включить его в соответствующий путь. Повторить Шаг 3, пока все вершины не будут включены в какой-либо путь.

Пример работы алгоритма для случая, когда длины $c(v) = 1 \forall v$, приведен на рис. 3. Зеленым цветом отмечены БС, красным – КП.

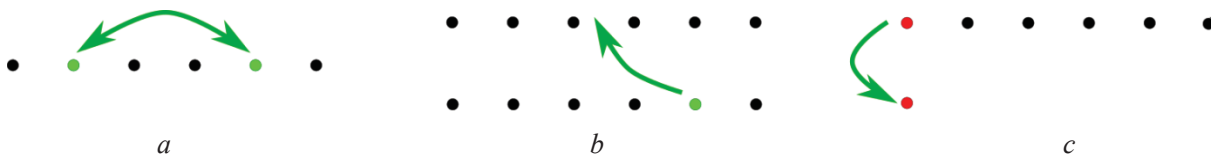


Рис. 3. Изменение путей в алгоритме имитации отжига в пунктах а–с шага 3
Fig. 3. Changing the paths in the simulated annealing algorithm in a–c points of the step 3

Очевидно, что в случае, когда все стоимости ребер равны, путь, найденный жадным алгоритмом, будет не более чем в два раза хуже оптимального. Отношение стоимостей найденного алгоритма и оптимального стремится к 2 при больших n : $Q=C/C_{opt}=2$.

В случае, когда стоимости ребер близки по значению друг к другу, можно использовать дополнительную балансировку. Для этого на Шаге 3 алгоритма *Nearest* при наличии нескольких наименьших ребер выбирается ребро, принадлежащее к самому короткому на данный момент пути. Далее эту вариацию алгоритма будем обозначать *Nearest+Balance*. Подобный подход ниже также используется и для других алгоритмов, что обозначено аналогичной пометкой в названии.

Часто число контроллеров питания и мест их размещения гораздо меньше, чем количество подключаемых БС. В этом случае можно перебрать все возможные варианты расположения контроллеров. Если же число комбинаций всё ещё велико, можно воспользоваться каким-либо приближённым алгоритмом направленного перебора. Далее для каждого варианта можно воспользоваться уже описанным жадным алгоритмом, обозначать этот алгоритм будем как *Perebor Nearest* (т. е. перебираем подходящие комбинации множества A' и для каждого варианта жадным алгоритмом *Nearest* находим решение).

Нахождение путей подключения объектов к центрам питания с использованием подхода имитации отжига

Метод имитации отжига для поставленной задачи предлагается реализовывать следующим алгоритмом:

Шаг 1. Алгоритмом Флойда найти матрицу расстояний для множества вершин $A \cup B$.

Шаг 2. Случайным образом сформировать пути $(a'_i, b'_1, b'_2, \dots)$, удовлетворяющие ограничениям. Задать некоторое начальное значение температуры T_0 .

Шаг 3. Совершить одно из действий (рис. 4):

- в случайно выбранном пути поменять местами две случайно выбранные его вершины;
- в случайно выбранных двух путях случайно выбранную вершину из одного пути перенести в другой, вставив ее случайным образом;
- случайный путь отцепить от первой вершины и присоединить к другой, ранее не использованной вершине из множества A .

Шаг 4. Если стоимость новой конфигурации путей меньше, чем изначальная, то принять изменения. Иначе, пусть $DistDifference$ – разница стоимостей конфигураций путей. Принять новые пути с вероятностью $exp(-DistDifference/temperature)$. Уменьшить температуру: $temperature=temperature * (1-T')$. Если $temperature > 1$, то перейти на Шаг 3.

В классической реализации алгоритма имитации отжига Шаг 3 состоит только из пункта (а). С учётом специфики рассматриваемой задачи были добавлены пункты (b) и (c). Этот алгоритм будем обозначать как *Otzig*.

Также была рассмотрена вариация данного алгоритма, в которой Шаг 3 в пунктах (а), (с) производит разворот пути или части пути, т. е. выстраивает узлы в обратном порядке. Далее будем называть эту вариацию *OtzigReverse*.

Результаты численных экспериментов

Сравнение результатов работы алгоритмов проводилось на графе-решетке $|X|=100$, стоимость ветвей – случайные числа от 1 до 10 условных единиц. Число вершин (БС), которые необходимо подключить к КП, отражено на оси абсцисс ($|B|$) на рис. 4. На этом рисунке по оси ординат представлено среднее значение стоимости найденных путей для 50 запусков программы.

На рис. 4, а показан случай, когда $|A|=|A'|=5$. Видно, что для небольших значений $|B|$ лучший результат дает алгоритм *OtzigReverse*. Для больших значений $|B|$ лучший результат дает алгоритм *Nearest*.

На рис. 4, б показан случай, когда $|A|=10$ и $|A'|=5$. В этом случае лучший результат дает алгоритм *OtzigReverse*.

На рис. 5 слева показаны результаты работы алгоритма *Nearest* с добавлением балансировки (*Balance*) в условиях $|A|=|A'|=5$. То есть при наличии нескольких наименьших ребер выбирается ребро, принадлежащее к самому короткому на данный момент пути.

На рис. 5 справа показаны результаты работы жадного алгоритма с переборным алгоритмом (*Perebor Nearest*). В этом случае можно использовать алгоритм *Nearest*. Алгоритм *Perebor Nearest* показывает лучшие результаты при больших $|B|$. Данный алгоритм целесообразно использовать при небольших значениях $|A|$ и $|A'|$.

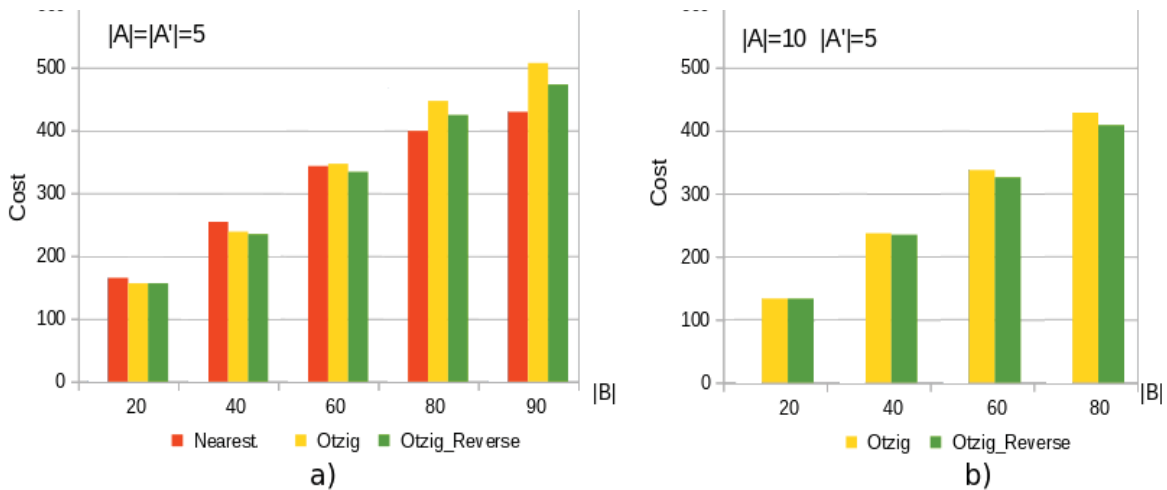


Рис. 4. Сравнение результатов работы алгоритмов при условии, что стоимости ветвей – случайные числа от 1 до 10 для $|A|=|A'|=5$ (a) и $|A|=10, |A'|=5$ (b)

Fig. 4. Comparison of the results of the algorithms under assumption that the cost of the branches are random numbers from 1 to 10 for $|A|=|A'|=5$ (a) and $|A|=10, |A'|=5$ (a)

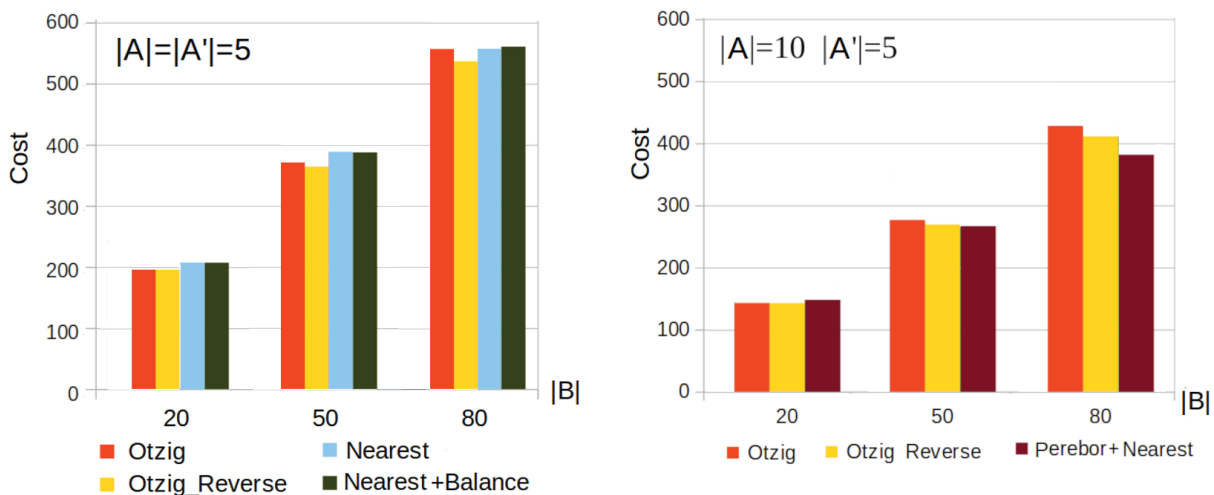


Рис. 5. Сравнение результатов работы алгоритмов с использованием балансировки и перебора для $|A|=|A'|=5$ (слева) и $|A|=10, |A'|=5$ (справа)

Fig. 5. Comparison of the results of the algorithms using balancing and enumeration for $|A|=|A'|=5$ (left) and $|A|=10, |A'|=5$ (right)

Также были проведены численные эксперименты на структуре шахты, приведённой на рис. 6. Требуется разместить 38 БС, из каждого КП может выходить 2 многожильных провода. Стоимость равна геометрическому расстоянию.

В первом случае (рис. 6, слева) полагается, что уже размещены 2 КП, т. е. $|A|=|A'|=2$ и $K_B=10$, т. е. в кабеле 10 жил. Решение, найденное алгоритмом *Nearest*, имеет стоимость 104,9 условных единиц, алгоритмом *Otzig* – 102, *OtzigReverse* – 97,1. Цветными линиями показаны пути, найденные лучшим алгоритмом (*OtzigReverse*). Как видно из рисунка, обратный метод отжига, в силу того что он является эвристическим, нашел не самые оптимальные пути: синий путь заканчивается вершина-

ми $\{...,6,23,24\}$, хотя эффективнее было бы пройти вершины в другом порядке $\{...,6,24,23\}$. Это произошло из-за того, что алгоритм имитации отжига всё-так является приближенным алгоритмом.

Таблица. Стоимости путей, найденные разными алгоритмами для $|A|=3, |A'|=2$

Table. Path costs found by various algorithms for $|A|=3, |A'|=2$

Алгоритм/Algorithm	Стоимость/Cost		
	($K_B=10$)	($K_B=15$)	($K_B=20$)
Otzig	101,4	101,8	101,7
OtzigReverse	98,4	100,8	98
PereborNearest	104,9	96,7	96,7
PereborNearest+Balance	103,1	95,9	93,6

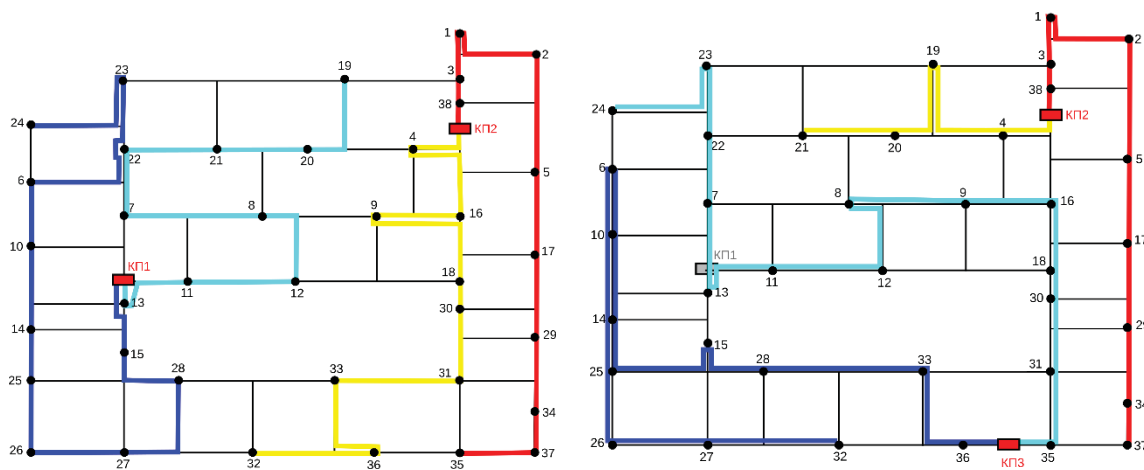


Рис. 6. Лучшие из найденных маршрутов прокладки кабелей при разных условиях: 2 КП, $K_B=10$ (слева) и 2 КП в 3 возможных АОШ, $K_B=15$ (справа)

Fig. 6. The best of the found cable laying routes under different conditions: 2 PCs, $K_B=10$ (left) and 2 PCs in 3 possible locations, $K_B=15$ (right)

Во втором случае (рис. 6, справа) полагается, что имеется три АОШ для размещения 2 КП, т. е. $|A|=3$, $|A'|=2$. Рассматривались три варианта, когда $K_B=10$ (в кабеле 10 жил), а также 15 и 20. Из КП может также выходить два провода. В таблице приведены результаты работы разных алгоритмов для данного графа. Цветными линиями показаны пути, найденные для пятнадцатизильного провода лучшим методом (*Perebor Nearest Balance*), со стоимостью 95,9. Отметим также, что для разных значения K_B оптимальные решения даются разными алгоритмами.

Заключение

Для задачи поиска путей минимальной стоимости для подключения базовых станций беспроводной связи к источникам питания в шахте многожильными кабелями предложено и протестировано несколько приближённых методов. Количество жил является параметром задачи, предполагается также, что из источника питания может исходить два таких кабеля. Кроме того, рассмотренная математическая постановка при введении дополнительных ограничений может быть полезной при решении других прикладных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов В.С. Правила безопасности в угольных шахтах – развитие многофункциональных систем безопасности // Горная промышленность. – 2017. – № 2 (132). – С. 77–83.
2. Шпенст В.А. Комплексование телекоммуникационных и электротехнических систем в шахтах и подземных сооружениях // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. – С. 78–87.
3. Шкрабец Ф.П. Электроснабжение подземных потребителей глубоких и энергоёмких шахт // Горные науки и технологии. – 2017. – № 3. – С. 25–46.
4. Шатунова Н.А., Шпенст В.А. Алгоритм выбора местоположения элементов беспроводных систем управления электротехническими комплексами подземных горных комбайнов // Горная Промышленность. – 2016. – № 3 (127). – С. 84–85.
5. Ваганов В.С., Гоффарт Т.В., Дубков И.С. Мультисервисные компьютерные сети в угольных шахтах. Особенности реализации и развития // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 3. – С. 56–69.
6. Насибуллина Т.В., Мигов Д.А. Практические аспекты моделирования сети энергоснабжения оборудования многофункциональной системы безопасности угольной шахты // Имитационное моделирование. Теория и практика: Труды 9-й Всерос. научно-практической конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. – Екатеринбург, 16–18 октября 2019. – Екатеринбург: Урал. гос. пед. ун-т., 2019. – С. 327–332.
7. Давыдов В.В. Шахтная беспроводная связь // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 11. – С. 221–229.
8. Ваганов В.С., Урусов Л. В. Анализ способов организации сетей передачи данных для построения современных МФСБ в угольных шахтах // научно-технический журнал ВЕСТНИК. – 2016. – № 3. – С. 72–81.
9. Designing of optimal power supply networks for the equipment of multifunctional safety systems / A. Kalney, D. Migov, T. Nasibullina, A. Rodionov, K. Tkachev, G. Toktoshov // Optimization Problems of complex systems: Proc. of the IEEE 15th Int. Asian School-Seminar. – Novosibirsk, Russia, 2019. – P. 187–191.
10. A network communication frequency routing protocol of coal mine safety monitoring system based on wireless narrowband data communication network / Zhang Jin, Chen Min, Liu YaHui, Yao Pingjian // Mobile Information Systems. – 2022. – P. 1–8.

11. Migov D., Yurgenson A. On optimal connection of base stations of wireless communication network to power supply centers in a mine // Proc. of the IEEE 2022 Int. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – Novosibirsk, Russia, 2022. – P. 980–983.
12. Zheng X., Wang B., Zhao J. High-precision positioning of mine personnel based on wireless pulse technology // PLoS One. – 2019. – Vol. 14 (7). – P. 1–25.
13. Baoye Song, Huimin Miao, Lin Xu. Path planning for coal mine robot via improved ant colony optimization algorithm // Systems Science & Control Engineering. – 2021. – Vol. 9:1. – P. 283–289.
14. Gao Yongxin, Dai Zhonglin, Yuan Jing. A multiobjective hybrid optimization algorithm for path planning of coal mine patrol robot // Computational Intelligence and Neuroscience. – 2022. – P. 1–10.
15. Jia-Chang Xu, You-Rui Huang. Path planning of robot in coal mine using genetic membrane algorithms // Proc. of the 2nd International Conference on Information Technologies and Electrical Engineering (ICITEE-2019). – New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, 2019. – Article 137. – P. 1–5.
16. Popkov V.K. On modeling city traffic systems with hypernetworks // Automation and Remote Contr. – 2011. – Vol. 72. – № 6. – P. 1309–1318.
17. Токтошов Г.Ы., Юргенсон А.Н., Мигов Д.А. Оптимизация маршрутов прокладки магистрального трубопровода для транспортировки георесурсов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 41–49. DOI: 10.18799/24131830/2019/6/2124
18. Токтошов Г.Ы. Методология выбора трасс для прокладки сетей и коммуникаций // Вестник СибГУТИ. – 2022. – Т. 1. – № 1. – С. 97–107.
19. Melamed I.I., Sergeev S.I., Sigal I.Kh. The traveling salesman problem. Approximate algorithms // Autom. Remote Control. – 1989. – Vol. 50:11. – P. 1459–1479.
20. Костюк Ю.Л. Задача коммивояжера: приближенный алгоритм по методу ветвей и границ с гарантированной точностью // ПДМ. – 2019. – № 45. – С. 104–112.
21. Ипатов А.В. Модифицированный метод имитации отжига в задаче маршрутизации транспорта // Труды ИММ УрОПАН. – 2011. – № 4. – Вып. 17. – С. 121–125.
22. Hamza A., Darwish A.H., Rihawi O. A new local search for the bees algorithm to optimize multiple traveling salesman problem // Intelligent Systems with Applications. – 2023. – Vol. 18. – 200242
23. Necula R., Breaban M., Raschip M. Tackling the Bi-criteria facet of multiple traveling salesman problem with ant colony systems // 2015 IEEE 27th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI), IEEE. – Italy, 2015. – P. 873–880.
24. Assaf M., Ndiaye M. Multi travelling salesman problem formulation // 2017 4th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), IEEE. – Cambodia, 2017. – P. 292–295.

Информация об авторах

Денис Александрович Мигов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6. mdinka@rav.sscs.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3386-4641>

Анастасия Николаевна Юргенсон, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6. nastya@rav.sscs.ru, <https://orcid.org/0009-0009-3743-1393>

Поступила в редакцию: 13.02.2024

Поступила после рецензирования: 11.04.2024

Принята к публикации: 28.11.2024

REFERENCES

1. Vaganov V.S. Safety rules in coal mines – development of multifunctional safety systems. *Mining industry*, 2017, no. 2 (132), pp. 77–83. (In Russ.)
2. Shpenst V.A. Integration of telecommunication and electrical systems in mines and underground structures. *Zapiski Gornogo instituta*, 2019, vol. 235, pp. 78–87. (In Russ.)
3. Shkrabets F.P. Electric supply of underground consumers of deep energy-intensive mines. *Mining Science and Technology*, 2017, vol. 3, pp. 25–46. (In Russ.)
4. Shatunova N.A., Shpenst V.A. Algorithm for selecting the location of elements of wireless control systems for electrical complexes of underground mining machines. *Mining Industry*, 2016, no. 3 (127), pp. 84–85. (In Russ.)
5. Vaganov V.S., Goffart T.V., Dubkov I.S. Multiservice computer networks in coal mines. Features of implementation and development. *Bulletin of the scientific center for the safety of work in the coal industry*, 2018, no. 3, pp. 56–69. (In Russ.)
6. Nasibullina T.V., Migov D.A. Practical aspects of modeling the power supply network for equipment of a multifunctional security system of a coal mine. *Proceedings of the 9th All-Russia. Scientific and Practical Conf. on simulation modeling and its application in science and industry. Simulation modeling. Theory and Practice*. October 16–18, 2019. Yekaterinburg, Ural State Pedagogical University Publ., 2019. pp. 327–332. (In Russ.)
7. Davydov V.V. Mining wireless communication. *Mining information and analytical bulletin*, 2010, no. 11, pp. 221–229. (In Russ.)
8. Vaganov V.S. Urusov L. V. Analysis of methods of organizing data transmission networks to build modern MFSB in coal mines. *Scientific and technical journal VESTNIK*, 2016, no. 3, pp. 72–81. (In Russ.)

9. Kalney A., Migov D., Nasibullina T., Rodionov A., Tkachev K., and Toktoshov G. Designing of optimal power supply networks for the equipment of multifunctional safety systems. *Proc. of the IEEE 15th Int. Asian School-Seminar. Optimization Problems of complex systems*. Novosibirsk, Russia, 2019. pp. 187–191.
10. Zhang Jin, Chen Min, Liu YaHui, Yao Pingjian. A network communication frequency routing protocol of coal mine safety monitoring system based on wireless narrowband data communication network. *Mobile Information Systems*, 2022, pp. 1–8.
11. Migov D., Yurgenson A. On optimal connection of base stations of wireless communication network to power supply centers in a mine. *Proc. of the IEEE 2022 Int. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*. Novosibirsk, Russia, 2022. pp. 980–983.
12. Zheng X., Wang B., Zhao J. High-precision positioning of mine personnel based on wireless pulse technology. *PLoS One*, 2019, vol. 14 (7), pp. 1–25.
13. Baoye Song, Huimin Miao, Lin Xu. Path planning for coal mine robot via improved ant colony optimization algorithm. *Systems Science & Control Engineering*, 2021, vol. 9:1, pp. 283–289.
14. Gao Yongxin, Dai Zhonglin, Yuan Jing. A multiobjective hybrid optimization algorithm for path planning of coal mine patrol robot. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, pp. 1–10.
15. Jia-Chang Xu, You-Rui Huang. Path planning of robot in coal mine using genetic membrane algorithms. *Proc. of the 2nd International Conference on Information Technologies and Electrical Engineering (ICITEE-2019)*. New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, 2019. Article 137, pp. 1–5.
16. Popkov V.K. On modeling city traffic systems with hypernetworks. *Automation and Remote Contr*, 2011, vol. 72, no. 6, pp. 1309–1318.
17. Toktoshov G.Y., Yrgenson A.N., Migov D.A. Optimization of routes for laying trunk pipeline to transport georesources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 6, pp. 41–49. (In Russ.)
18. Toktoshov G.Y. The route choosing methodology for networks and communications laying. *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*, 2022, vol. 1, no. 1, pp. 97–107. (In Russ.)
19. Melamed I.I., Sergeev S.I., Sigal I.Kh. The traveling salesman problem. Approximate algorithms. *Autom. Remote Control*, 1989, vol. 50:11, pp. 1459–1479.
20. Kostyuk Yu.L. The traveling salesman problem: approximate algorithm by branch-and-bound method with guaranteed precision. *Prikladnaya Diskretnaya Matematika*, 2019, no. 45, pp. 104–112. (In Russ.)
21. Ipatov A.V. Enhanced simulated annealing in the vehicle routing problem. *Trudy IMM UrORAN*, 2011, no. 4, vol. 17, pp. 121–125. (In Russ.)
22. Hamza A., Darwish A.H., Rihawi O. A new local search for the bees algorithm to optimize multiple traveling salesman problem. *Intelligent Systems with Applications*, 2023, vol. 18, 200242.
23. Necula R., Breaban M., Raschip M. Tackling the Bi-criteria facet of multiple traveling salesman problem with ant colony systems. *2015 IEEE 27th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, IEEE. Italy, 2015. pp. 873–880.
24. Assaf M., Ndiaye M. Multi travelling salesman problem formulation. *2017 4th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, IEEE. Cambodia, 2017. pp. 292–295.

Information about the authors

Denis A. Migov, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6, Academic Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. mdinka@rav.sccc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3386-4641>

Anastaiya N. Yurgenson, Cand. Sc., Researcher, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6, Academic Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. nastya@rav.sccc.ru, <https://orcid.org/0009-0009-3743-1393>

Received: 13.02.2024

Revised: 11.04.2024

Accepted: 28.11.2024