

УДК 656.135:004.023

**Д. Г. Менлияхматов, М.С. Ляпустин, А.В. Липенков**  
**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ИМИТАЦИИ ОТЖИГА ДЛЯ**  
**РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

В статье рассматривается вопрос применимости метода «имитации отжига» для решения задачи маршрутизации транспорта при грузовых перевозках. Дано детальное описание алгоритма «имитации отжига», а так же описание метода Кларка-Райта. Приведено описание результатов сравнительного анализа двух алгоритмов на выборках случайных маршрутов с различным количеством вершин.

**Ключевые слова:** грузовые перевозки, маршрутизация, метод имитации отжига, комбинаторная оптимизация.

С развитием компьютерных технологий классические методы решения задач маршрутизации начали уступать эвристическим. Очевидно, что использование специализированного программного обеспечения при планировании маршрутов доставки грузов повысит эффективность работы предприятия. Сложность задачи маршрутизации заключается в её большой размерности, вследствие чего нахождение точного решения не всегда является возможным. Однако существуют методы, позволяющие найти оптимальные решения. Одним из них является метод имитации отжига.

Применение метода «имитации отжига» [1] рассматривают, как правило, в рамках задачи коммивояжера [2-3]. Гораздо реже его рассматривают в рамках задачи маршрутизации [4], т.е. в задачах, когда грузоподъемность единицы подвижного состава является ограниченной, что не позволяет объехать сразу все пункты доставки в рамках одного кольцевого маршрута, как это происходит при решении задачи коммивояжера.

Задача маршрутизации относится к классу NP-трудных задач, что означает экспоненциальную зависимость вычислительной сложности от размера входных параметров. Идея метода имитации отжига основана на процессе, происходящем при кристаллизации вещества, в том числе при отжиге металлов. При высокой температуре металл находится в жидком состоянии, и его атомы расположены хаотично. Далее постепенно снижается температура, а атомы вещества начинают формировать кристаллическую решетку, которая описывает положения атомов. Каждой совокупности этих положений соответствует энергия, которую необходимо минимизировать, так как положение атомов с наименьшим количеством энергии будет характеризовать наиболее стабильное состояние системы, при котором риск появления дефектов минимален. Атомы стремятся перейти в состояние с меньшим количеством энергии, однако с некоторой вероятностью могут совершить переход в состояние с большей энергией. Эта вероятность снижается вместе с температурой. Как ни странно, эта особенность позволяет отыскать наиболее выгодное состояние.

На основе данного процесса и был придуман алгоритм имитации отжига. Построение маршрута происходит по похожей схеме. Аналогом энергии будет функция, которую необходимо минимизировать – например, длина маршрута. А аналогом температуры – некоторая положительная убывающая величина.

В общем виде алгоритм будет выглядеть следующим образом.

Исходные данные:  $t_{\min}$  – минимальная температура;  $t_{\max}$  – максимальная температура;

1. Формируется произвольное начальное решение  $x_1$ ;
2.  $t_1 = t_{\max}$ ;

Пока  $t_i > t_{\min}$  будут выполняться следующие действия:

3. Формируется новое состояние  $x_c = x_{i+1}$ ;

4.  $\Delta E = E(x_c) - E(x_i)$ ;

где  $\Delta E$  – приращение энергии;  $E(x_c)$  – энергия текущего состояния;  $E(x_i)$  – энергия предыдущего состояния;

5. Если  $\Delta E \geq 0$ , то  $x_c = x_i$ ;

6. Если  $\Delta E < 0$ , то переход осуществляется с вероятностью, которая вычисляется в соответствии с распределением Гиббса:

$$p = e^{\frac{-\Delta E}{t_i}}$$

7. Снижение температуры  $t_i = T$ , где  $T$  – закон убывания температуры.

Для сравнения результатов, полученных методом имитации отжига, рассмотрим наиболее известный в отечественной литературе эвристический метод Кларка-Райта. Метод был разработан двумя учеными Г. Кларком и Дж.В. Райтом. Относится к числу приближенных методов. Идея метода основана на понятии эффекта (выгоды), который получается путем объединения двух маятниковых маршрутов в один кольцевой. Выгода заключается в сокращении пробега от этого объединения.

Исходными данными будут являться расстояния между клиентами и необходимый им объем ввоза (вывоза) груза.

Алгоритм метода выглядит следующим образом:

1. Формируется матрица расстояний;

2. Формируется матрица километровых выигрышей, в которой будет отражено на сколько сократится маршрут при объединении  $ij$  маятникового маршрута;

Километровый выигрыш считается по следующей формуле:

$$s_{ij} = l_{0i} + l_{0j} - l_{ij},$$

где  $l_{0i}$  – расстояние от поставщика до  $i$ -го клиента;  $l_{0j}$  – расстояние от поставщика до  $j$ -го клиента;  $l_{ij}$  – расстояние между  $i$ -м и  $j$ -м клиентом.

3. В матрице километровых выигрышей находится ячейка с максимальным километровым выигрышем, которая должна удовлетворять трем условиям:

- пункты  $ij$  не входят в состав одного маршрута;

- пункты  $ij$  являются начальным или конечным пунктом маршрута, в состав которого они входят;

- ячейка  $s_{ij}$  не рассматривалась на предыдущих шагах.

4. Если  $l_{0i}$  не превышает грузоподъемность подвижного состава, то маршруты можно объединить, иначе возвращаются к п.3.

5. Производится объединение  $i$ -го и  $j$ -го маршрутов.

Пункты 3-5 повторяются до тех пор, пока все клиенты не будут включены в конечный план объезда.

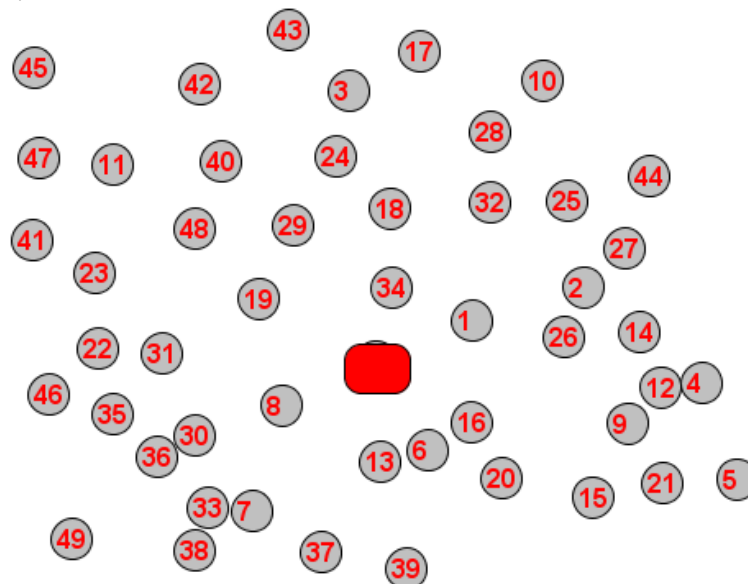
Для проведения анализа оба метода были реализованы в программном обеспечении AnyLogic 7, предназначенного для имитационного моделирования. Программа обладает своей графической средой и позволяет использовать язык Java для разработки различных моделей.

В модели имитации отжига вследствие переходов в худшее состояние конечный результат может оказаться хуже рассмотренных ранее. Для нахождения наиболее удачного

решения за конечный результат принимается не последний найденный маршрут, а лучшее из рассмотренных решений в процессе выполнения модели.

Специально для решения задачи маршрутизации, вышеприведенный алгоритм метода имитации отжига претерпел изменения. Основная идея осталась прежней, однако был изменен механизм расчёта целевой функции. Если в исходной последовательности объезда следующий пункт потребует больше груза, чем оставшееся в грузовике количество после посещения предыдущего клиента, то при расчете целевой функции вместо расстояния между предыдущим и последующим пунктами будет учитываться расстояние от предыдущего до поставщика в сумме с расстоянием от поставщика до следующего, что будет символизировать процесс возвращения подвижного состава на предприятие для погрузки и дальнейшего развоза груза. То же самое относится к визуальной реализации построения маршрута. Таким образом, полученный маршрут будет условно состоять из нескольких малых маршрутов.

В ходе исследования задача была решена обоими методами на маршрутах с различным количеством клиентов. Расположение клиентов выбиралось произвольно с помощью генератора случайных чисел (рис. 1). Результаты решения методом Кларка-Райта представлены на рис. 2, методом имитации отжига на рис. 3. Сравнение результатов представлено в табл. 1.



**Рис. 1. Исходное расположение клиентов на маршруте (50 пунктов доставки)**

Из табл. 1 видно, что на маршрутах до 30 клиентов методы показывают одинаковые результаты, а на маршрутах от 30 клиентов метод Кларка-Райта начинает давать решения хуже по сравнению с методом имитации отжига.

По результатам проведенного анализа можно сделать вывод, что применение современных эвристических методов для решения задачи маршрутизации более эффективно по сравнению с классическими методами. Особенно это выражено при увеличении числа пунктов доставки.

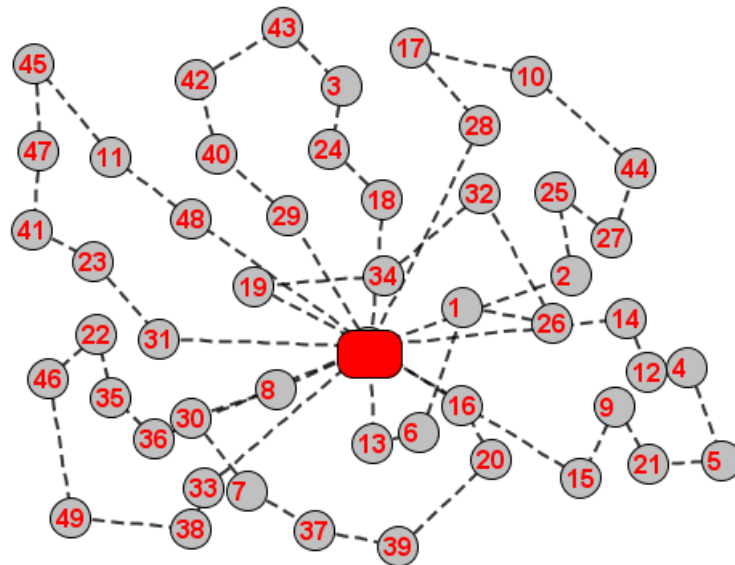


Рис. 2. Решение, полученное методом Кларка-Райта

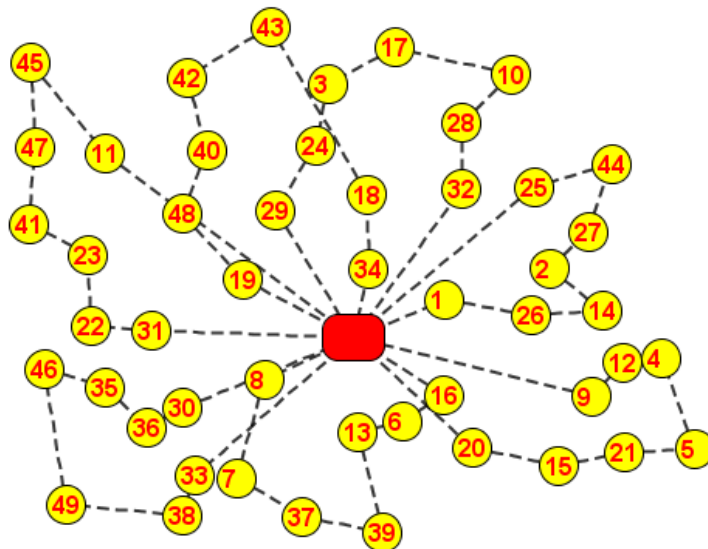


Рис. 3. Решение полученное методом имитации отжига

Таблица 1  
Результаты решения

Количество клиентов	Метод Кларка-Райта	Метод имитации отжига
10	90,807	90,807
15	121,952	121,952
20	143,408	143,408
25	169,162	169,162
30	201,039	195,117
35	232,148	207,298
40	256,127	238,632
45	299,947	281,447
50	341,701	314,166

*Библиографический список*

1. Kirkpatrick, S. Optimization by Simulated Annealing [Text] / S.Kirkpatrick, Jr. C.D.Gelatt, M.P. Vecchi // Science. 220. 1983. P. 671-680.
2. Ватугин, Э.И. Параметрическая оптимизация алгоритма имитации отжига на примере решения задачи поиска кратчайшего пути в графе [Текст] / Э.И. Ватугин, В.С. Титов // Вестник Череповецкого государственного университета. 2015. №7 (68). С. 13-16.
3. Зубарев, А.К. Планирование маршрутизации движения транспорта в условиях крупного города [Текст] / А.К. Зубарев // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2013. № 3. С. 161-167.
4. Ипатов, А.В. Модифицированный метод имитации отжига в задаче маршрутизации транспорта [Текст] // Труды института математики и механики УРО РАН. 2011. № 4. С. 121-125.
5. Введение в оптимизацию. Имитация отжига. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://habrahabr.ru/post/209610/> Дата обращения 24.02.16
6. Ляпустин, М.С. Использование метода имитации отжига для нахождения рациональных маршрутов при грузовых перевозках [Текст] / М.С. Ляпустин, М.Г. Менлияхматов, А.В. Липенков // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы: матер. 94 межд. науч.-техн. конф. (НГТУ, 18 марта 2016 г.) / под ред. С.М. Дмитриева. – Н. Новгород, 2016. – С. 254-257.