

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗАЦИИ ПОДВОДА ГРУЗОВ К ПРИПОРТОВОЙ СТАНЦИИ ТРАНСПОРТНОГО УЗЛА

**Федор МИХАЙЛОВ**

*Докторант института железнодорожного транспорта  
Рижского технического университета, Латвия*

### 1. Постановка задачи

Для решения задач дискретной оптимизации, относящихся к классу *NP*-трудных, пока не найдено алгоритмов решения, имеющих полиномиальную сложность, а также не доказано как существование, так и отсутствие подобных алгоритмов.

Для поиска оптимальных решений *NP*-полных комбинаторных задач учеными разработано множество методов и алгоритмов. Однако для практического использования их возможности ограничены из-за невозможности преодоления «проклятия размерности», присущего рассматриваемому классу задач. Точные методы практически не применимы для поиска решений при большом числе исходных данных. Одним из подходов, позволяющим убрать это ограничение, являются эвристические методы дискретной оптимизации.

Эвристические методы не гарантируют обнаружения глобального решения за полиномиальное время. Но данные методы позволяют найти более приемлемые или «рациональные» решения трудных практических задач поиска за меньшее время, чем другие, обычно применяемые в этих случаях методы. Под «рациональными» понимаются решения, которые удовлетворяют исследователя, соответствуют конкретным запросам практики. Довольно часто на практике целью поисков являются решения, удовлетворяющие определенным ограничениям, например, время простоя вагонов на станции не должно быть больше порогового (нормы) или количество брошенных составов на подходе к припортовой станции не должно быть больше заданной величины. В этих случаях достаточно найти «рациональное», т.е. разумное решение.

### 2. Описание метода мультиагентной оптимизации

Метод мультиагентной оптимизации *Ant Colony System (ACS)*, впервые предложенный *M. Dorigo, V. Maniezzo* и *A. Colorni*, является эвристическим методом, который применяется для решения сложных комбинаторных оптимизационных задач. Этот метод характеризуется следующим:

- *универсальностью*. Применяется для решения различных аналогичных задач, например, простая задача коммивояжера (ПЗК) или ассиметричная задача коммивояжера (АЗК);

- *устойчивостью*. Для применения данного метода при решении других задач, например, квадратичной задачи о назначении (КЗН) или составлении расписаний требуются незначительные изменения в методе;
- *использованием популяции искусственных агентов*. Метод использует позитивную обратную связь как механизм поиска решения. Данный подход хорошо согласуется с параллельной реализацией алгоритма.

В основу метода легли исследования поведения муравьиных колоний, в котором одним из изучаемых вопросов был следующий: как муравьи, обладающие слабым зрением и очень скромными индивидуальными способностями, могут, действуя совместно в колонии, находить кратчайшие пути между двумя точками (например, от муравейника до места питания).

Объяснить это можно тем, что муравьи передают информацию по пути следования: каждый из них, передвигаясь, оставляет вещество, называемое феромоном, которое обнаруживают другие особи. Пока муравей не имеет информации, он передвигается случайным образом. Муравей, следующий по пути, по которому уже прошли другие особи, предпочитает двигаться по уже размеченному маршруту (и вероятность этого зависит от интенсивности воспринимаемого следа), в свою очередь, оставляя феромон, который добавляется к уже существующему. Возникающий коллективный эффект является формой автокаталитического поведения или поведения на основе позитивной обратной связи, при котором чем больше муравьев следует по определенному пути, тем более привлекательным он становится для других муравьев. Процесс характеризуется позитивной обратной связью: фактически вероятность, с которой муравьи выбирают путь, увеличивается пропорционально количеству муравьев, которые уже выбрали этот путь. Конечный результат состоит в том, что почти все муравьи выберут кратчайший путь, даже если решение каждого отдельного муравья всегда остается вероятностным.

В методе *ACS* решения строят искусственные автономные агенты. Каждый автономный агент обладает следующими характеристиками:

- искусственный агент имеет память;
- умеет «видеть», т. е. при выборе пути он руководствуется видимым расстоянием до следующего узла;
- все агенты «живут» в пространстве с дискретным временем.

### 3. Определение составных элементов графа

Пространство выбора оптимального подвода составов к припортовой станции можно представить полным двудольным неориентированным графом  $G = (V, E)$ . Множество  $V_1$  – это множество нитей графика движения поездов. Тогда  $V_2$  – это множество составов, которым необходимо поставить в соответствие нити графика. Причем:

$$V_1 \cap V_2 = \emptyset, \quad V_1 \cup V_2 = V.$$

Пусть  $|V_1| = m$  и  $|V_2| = n$ , тогда каждое ребро  $e_{ij} \in E(i = \overline{1\dots m}, j = \overline{1\dots n})$  имеет две числовые характеристики:

- коэффициент *видимости*  $\eta_{ij}$ , представляющий собой оценку *качества* назначения  $j$ -му составу  $i$ -й нити графика;
- количество *следа (феромона)*  $\tau_{ij}$ , оставленного остальными автономными агентами на ребре.

Для вычисления коэффициента *видимости*  $\eta_{ij}$  предлагается использовать комбинацию *потенциалов*  $d$  и  $f$  соответствующих матриц  $D$  и  $F$ . Каждый из потенциалов  $d$  и  $f$  представляет собой вектор-столбец, получаемый суммированием элементов каждой строки соответствующей матрицы:

$$d_i = \sum_{j=1}^n d_{ij}, \quad (i = \overline{1\dots n}),$$

$$f_i = \sum_{j=1}^m f_{ij}, \quad (i = \overline{1\dots m}).$$

Коэффициент *видимости*  $\eta_{ij}$ , рассчитываемый по формуле, характеризует степень *привлекательности (пригодности)* выбора назначения  $h$ -го состава  $i$ -й нити графика:

$$\eta_{ih} = \frac{1}{S_{ih}},$$

где:  $S_{ih} = d_i \cdot f_h$  – элемент матрицы  $S$ , полученной произведением вектора-столбца  $d$  на транспонированный вектор-столбец  $f$ :

$$S = d \cdot f^T.$$

В методе *ACS* каждый искусственный агент, строя свое решение, выполняет следующие действия:

1. Когда он выбирает  $i$ -ю нить, чтобы назначить ее  $j$ -му составу, он оставляет вещество, называемое *следом* (эквивалент феромона)  $\tau_{ij}$  на ребре  $(i, j)$ .

2. Он выбирает состав, которому должна быть задана данная нить с вероятностью, которая зависит от «потенциальной пригодности»  $\eta_{ij}$  ребра  $(i, j)$  и количества следа  $\tau_{ij}$ , присутствующего на данном ребре.
3. Чтобы получить полную перестановку, нити графика и составы, которые уже попарно распределены, запоминаются агентом и в последующем выборе не используются до тех пор, пока все работы не будут назначены.

Эвристический метод *ACS* использует популяцию агентов, которые пошагово вырабатывают решение, назначая какую-либо нить графика каждому составу. Когда все агенты определяют их перестановки, наилучшие назначения вознаграждаются, чтобы стимулировать лучшие решения в следующих циклах.

Чтобы удовлетворить требованию, состоящему в том, что автономные агенты назначают каждой из нити графика различные составы, необходимо связать с каждым искусственным агентом некую структуру данных, называемую *tabu list*. Эта структура используется как хранилище уже распределенных составов, что предотвращает повторное назначение им новой нити, пока не завершен цикл, определяющий полную перестановку. Когда перестановка выполнена, *tabu list* очищается, и агенты вновь получают возможность выбирать, какой нити графика назначить какой состав. В качестве базовой структуры *tabu list* в *ACS* используется вектор, обозначаемый  $tabu_k$ , это *tabu list*  $k$ -го агента. Тогда  $tabu_k(s)$  –  $s$ -й элемент *tabu list*  $k$ -го агента (состав, которому назначена  $s$ -я нить графика при построении решения  $k$ -м агентом). Локальное решение отдельного агента строится случайным образом с использованием метода Монте-Карло на основе значений как переменной  $\eta_{ij}$ , так и  $\tau_{ij}$ , которая представляет собой уровень следа.

Пусть  $k(k = \overline{1..m})$  – индекс каждого автономного агента, входящего в популяцию  $m$  агентов. Вероятность того, что  $k$ -й агент назначит нить  $j$  составу  $i$ , рассчитывается по формуле:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{r \notin tabu_k} ([\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta)}, \\ 0 \end{cases}$$

если  $j \notin tabu_k$ , в противном случае при  $\alpha \geq 0$ ;  $\beta \geq 0$ .

Построение локальных решений каждого агента начинается с состава первой нити, выбирая случайным образом из всех доступных составов. На сле-

дующем шаге назначается состав для второй нити, выбор осуществляется случайным образом среди тех составов, которые еще не назначены, и т. д. Процедура повторяется для всех  $n$  нитей. Процесс построения решения повторяется  $m$  раз, т. е. по количеству агентов в популяции.

Параметры  $\alpha$  и  $\beta$  позволяют определить относительную важность следа  $\tau_{ij}(t)$  по отношению к *пригодности*  $\eta_{ij}$ . Следовательно, вероятность  $p_{ij}^k(t)$  является компромиссом между *пригодностью* ребра и интенсивностью следа ребра (если большое количество агентов прошло по ребру  $(i, j)$ , то это ребро становится, вероятно, более *желательным*). Количество *следа*  $\tau_{ij}$  (феромона) на ребре  $(i, j)$  изменяется после того, как все агенты построили свои решения. Изменение *следа* (феромона) происходит по формуле:

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij},$$

где:  $\rho$  – коэффициент *стойкости* следа, (феромона) (тогда  $(1-\rho)$  – коэффициент *выветривания*).

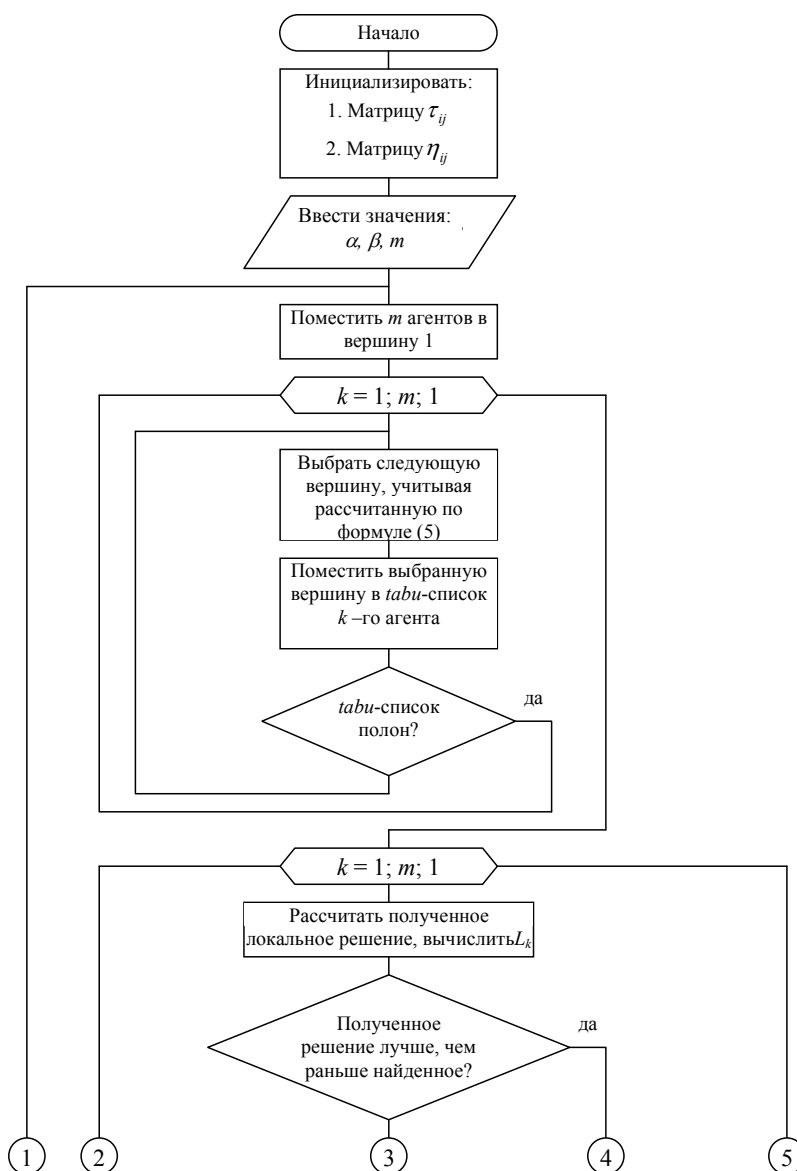
$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k,$$

где:  $\Delta\tau_{ij}^k$  – это количество следа оставленного на ребре  $(i, j)$   $k$ -м агентом в процессе построения решения.

Начальной интенсивности следа  $\tau_{ij}(0)$  может быть присвоено небольшое произвольно выбранное положительное значение. Коэффициент  $\rho$  должен быть константой ( $\rho < 1$ ) для избегания неограниченного накопления следа.

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{если } k\text{-й агент выбирал ребро } (i, j). \\ 0 & \end{cases}$$

где:  $Q$  – количество *следа* (феромона), которое может оставить агент за один цикл построения решения;  $L_k$  – значение целевой функции, полученной  $k$ -м агентом.



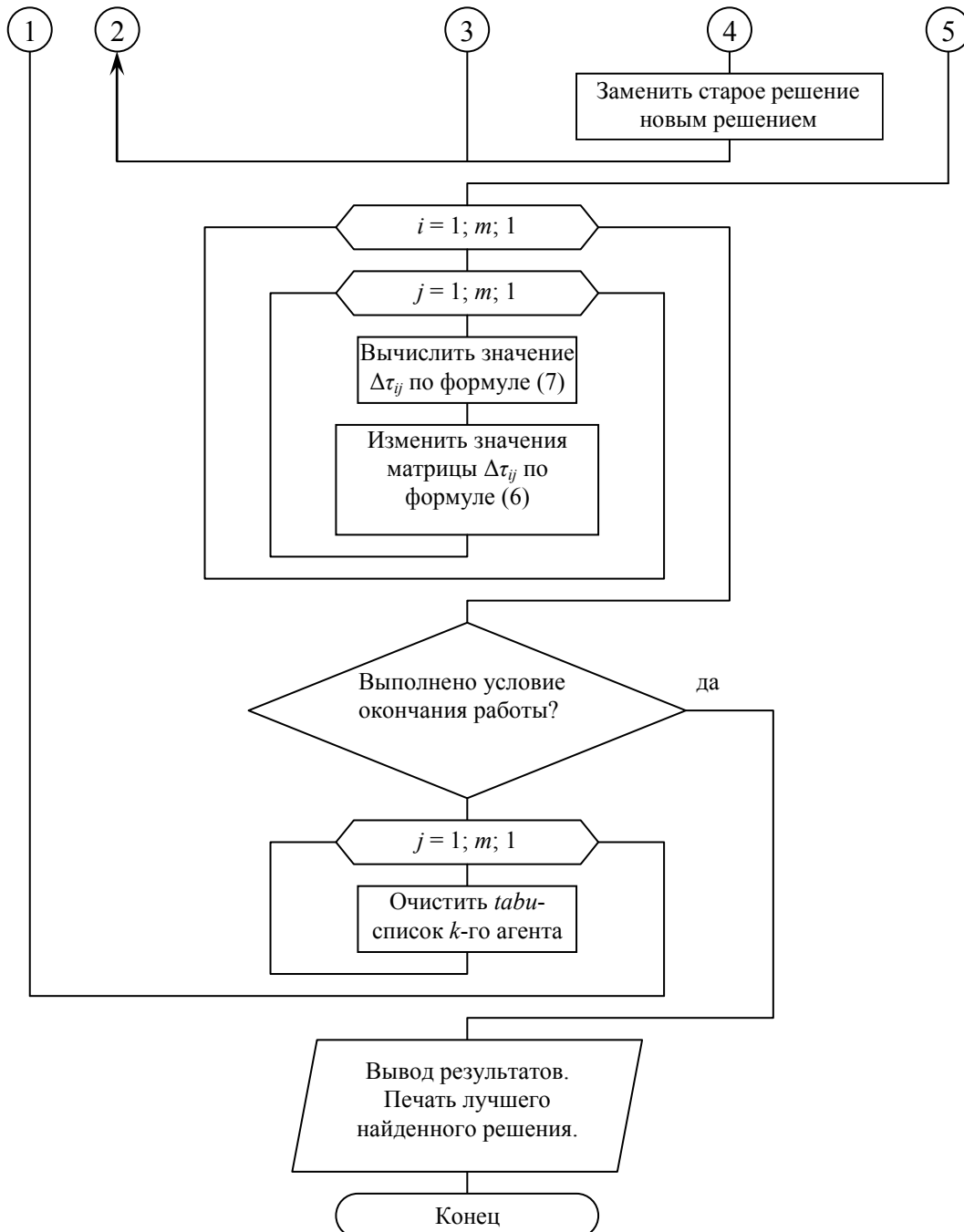
**Рис. 1.** Алгоритм автоматизации распределения нитей графика движения поездов методом *Ant Colony System*

Таким образом, наилучшее решение (с соответствующим нижним значением  $L_k$ ) должно характеризоваться большим количеством *следа* на ребрах, которые определяют нижние значения целевой функции (то есть ребра, входящие в решение, лучшим образом удовлетворяющее целевой функции).

Для представленного ниже алгоритма автоматизации распределения нитей графика движения (рис. 1, 2) в качестве условия выхода можно использовать:

- время работы алгоритма, которое больше ранее заданного значения;

- разность между всеми полученными локальными решениями и лучшим решением меньше некоторого заданного  $\epsilon$ ;
- локальные решения всех агентов приняли одинаковое значение.



**Рис. 2.** Алгоритм автоматизации распределения нитей графика движения поездов методом *Ant Colony System* (продолжение)

Эффективность алгоритма зависит от выбора значений параметров  $\rho$  (коэффициент *стабильности* следа),  $\alpha$  (коэффициент *значимости* следа),  $\beta$  (коэффициент значимости *пригодности*) и  $m$  (количество популяции агентов). Также существует ряд комбинаций  $\alpha/\beta$ , позволяющих находить хорошие решения за приемлемое время.

#### 4. Выводы

В работе для автоматизации распределения нитей графика движения предложен эвристический алгоритм мультиагентной оптимизации *Ant Colony System*, учитывающий при нахождении оптимального решения коэффициенты тяготения составов друг другу и временные интервалы между нитями графика движения поездов. Разработанный алгоритм в дальнейшем даст возможность совместно с имитационным моделированием как универсальным подходом к принятию решений в трудно определяемых условиях, принимая во внимание трудно формализуемые факторы, применять основные принципы системного подхода для решения практических задач подвода грузов.

#### Литература

1. Правдин, Н. В.; Негрей, В. Я. 1977. *Взаимодействие различных видов транспорта в узлах*. «Высшая школа». 296 с.
2. Сотников, И. Б. 1976. *Взаимодействие станций и участков железных дорог*. Москва: Транспорт. 272 с.
3. Абрамов, А. А. 2002. *Математическое моделирование транспортных процессов*. РГОТУПС. Москва. 128 с.
4. Круминьш, Н.; Витолиньш, К. 2007. *Логистика в Восточной Европе*. Министерство сообщений Латвийской Республики. 192 с.