УДК519.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ ТРАНСПОРТНОГО ТИПА

ГВОЗДИНСКИЙ А.Н., ЗАКУТНИЙ С.В.

Исследуются алгоритмы, с помощью которых возможно решить задачи составления оптимального количества задействованного транспорта и перечня выполнения рейсов самолетов для минимизации времени выполнения полного цикла полетов.

1. Введение

Состояние проблемы. Под названием “транспортная задача” объединяется широкий круг задач с единой математической моделью. Они относятся к задачам оптимизации и могут быть решены различными способами. Однако матрица системы ограничений транспортной задачи настолько своеобразна, что для ее решения разработаны специальные методы. Эти методы позволяют найти начальное опорное решение, а затем, улучшая его, получить оптимальное решение.

Транспортная задача заключается в том, что необходимо найти оптимальный план перевозок груза с баз потребителям.

Существует два типа транспортных задач: по критерию стоимости (план перевозок оптимален, если достигнут минимум затрат на его реализацию) и по критерию времени (план оптимален, если на его реализацию затрачивается минимум времени).

Многие важные модели линейного программирования часто содержат тысячи операций (переменных) и сотни ограничений, в связи с чем применение эффективных алгоритмов становится не только выгодным, но и просто необходимым. Например, составление сложного комплекса технологических работ, выполнение крупных деталей оборудования, системы связи.

Транспортная задача – это один из первых примеров оптимизации на линейных сетях. В настоящее время эта задача стала типовой для промышленных фирм, имеющих несколько предприятий, складов, рынков сбыта и оптовых баз. Модель применяется главным образом при решении плановых задач. В этом случае стратегические решения сводятся к выбору транспортных маршрутов, по которым продукция различных предприятий доставляется на несколько складов или в различные конечные пункты назначения.

Актуальность рассмотренной задачи состоит в том, что в наше время составление расписания очень важно с точки зрения его правильности и количества задействованного транспорта (ресурсов) при его выполнении. Очень актуальным является вопрос о составлении оптимального плана (расписания) с точки зрения минимизации времени простоя (отдыха) ресурсов и использования оптимального их количества.

Сущность исследования заключается в поиске наиболее эффективных математических, алгоритмических и программных методов для решения задач транспортного типа со спецификой рассматриваемой задачи [1].

Цель исследования заключается в минимизации времени выполнения циклов рейса и оптимальном использовании транспортных ресурсов. Для достижения цели решаются такие задачи: анализ алгоритмов, которые бы помогли решить поставленную задачу; выбор адаптированного алгоритма; составление подсистемы, которая на основе адаптированного алгоритма, выводит перечень рейсов для выполнения полета за минимально оптимальное время; определение количества требуемых ресурсов для выполнения составленного расписания.

2. Постановка задачи

Авиакомпания хочет организовать полеты «туда» и «обратно» так, чтобы минимизировать время простоя. Каждый самолет, который выполняет рейс на авиалинии, перевозит пассажиров и груз. Во время рейса используется некоторое количество ресурсов (горючее, смазочные материалы, затраты на обслуживание), которые составляют в стоимостном выражении себестоимость рейса. Необходимо исследовать распределение самолетов по авиалиниям, при котором выполняются запланированные показатели перевозок при минимальной общей их стоимости [2].

3. Построение математической модели

Транспортная задача линейного программирования в настоящее время широко распространена в теоретических обработках и практическом применении на транспорте и в промышленности. Особенно важное значение она имеет в деле рационализации поставок важнейших видов промышленной и сельскохозяйственной продукции, а также оптимального планирования грузопотоков и работы различных видов транспорта (автобусов, самолетов, маршрутных такси). Введем следующие обозначения: n – количество типов самолетов, $n = 5$; m – количество авиалиний, $m = 3$.

Индекс будем использовать для указания авиалиний и для указания типов самолетов: вместимость самолета (чел.); грузоподъемность самолета (т); план перевозки пассажиров за месяц на i-й авиалинии (тыс. чел./мес.); план перевозку грузов за месяц на i-й авиалинии (т/мес.); максимальное количество рейсов j-го типа самолета на i-й авиалинии за один месяц; имеющееся в наличии у авиакомпании количество самолетов; коэффициент исправности.

Целевая функция, задающая критерий минимизации, имеет вид:

$$F(x) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}c_{ij} \to \max , \qquad (1)$$

где $F(x)$ задает общую стоимость перевозок за один месяц.

Определим ограничения, присутствующие в условии задачи: $s_{ij} = q_{ij}u_i, \forall_{ij}$ – объем перевозок пассажиров (тыс. чел./мес.); $o_{ij} = q_{ij}v_i, \forall_{ij}$ – объем перевозок грузов (т/мес.)

Хотя самолет перевозит и пассажиров и груз одновременно, ограничения по выполнению перевозок пассажиров и груза можно рассматривать отдельно, так как вместительность и грузоподъемность самолета независимы друг от друга:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum\limits_{j=1}^{n} x_{ij}s_{ij} \ge a_i \\ \sum\limits_{i=1}^{m} x_{ij}o_{ij} \ge b_i \end{array} \right\} i = \overline{1,m} \qquad (2)$$

или

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum\limits_{j=1}^{n} x_{ij}u_{ij}q_{ij} \ge a_i \\ \sum\limits_{i=1}^{m} x_{ij}v_{ij}q_{ij} \ge b_i \end{array} \right\} i = \overline{1,m} \; . \qquad (3)$$

Также учитываются ограничения на количество самолетов каждого типа, которые имеются у авиакомпании, и ограничения неотрицательных искомых переменных. Учитывая тот факт, что некоторые самолеты могут иметь неисправности, эти ограничения имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum\limits_{i=1}^{m} x_{ij} \le p_{ij}k_{ij} \;\; j = \overline{1,n} \\ x_{ij} \ge 0 \; \forall_{ij} \end{array} \right\} i = \overline{1,m} \; . \qquad (4)$$

Заметим, что суммарный возможный объем перевозок всеми самолетами превышает суммарный план и, следовательно, требование целочисленности можно опустить. При этом дробные значения x_{ij} будут означать частичное использование j - го типа самолета на i-й авиалинии.

Полная математическая модель поставленной задачи выражается в виде [3]:

$$F(x) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}c_{ij} \to \max \qquad (5)$$

при условиях

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum\limits_{j=1}^{n} x_{ij}u_{ij}q_{ij} \ge a_i \\ \sum\limits_{i=1}^{m} x_{ij}v_{ij}q_{ij} \ge b_i \\ \sum\limits_{i=1}^{m} x_{ij} \le p_{ij}k_{ij}, \; j = \overline{1,n} \\ x_{ij} \ge 0, \forall_{ij} \end{array} \right\}, i = \overline{1,m} \; . \qquad (6)$$

4. Исследование и разработка методов решения

Для составления плана придуман не один алгоритм, но так как транспортные задачи такого вида являются глубоко вырожденными, т.е. один рейс (работа) должен выполняться только одним исполнителем, то не всякий алгоритм это сможет решить.

Симплекс-метод хорошо справляется с т-задачами, но так как эта задача транспортного типа особого назначения, т.е. на каждый заказ назначается только один исполнитель, то она глубоко вырождена и симплекс-метод не применяем.

Венгерский метод основан на некоторых довольно трудных и нетривиальных комбинаторных свойствах матрицы. Этот метод дает хорошие результаты, но его довольно трудно программировать. Преобразования матриц происходят таким образом, чтобы найти в них нули, которые были бы единственными в соответствующем столбце, они и будут искомым планом.

Метод Мака имеет преимущество более простого интуитивного обоснования, ведь это – логический процесс. Этот метод основан на идее выбора в каждой строке минимального элемента. Вообще говоря, минимальные элементы строк не распределены по всем столбцам матрицы. Здесь используется идея сложения (или вычитания) одного и того же значения по всем элементам строк по столбцам. Если в каждом столбце имеется подчеркнутый элемент, работа алгоритма закончена. По элементам, которые соответствуют оптимальному выбору, может быть вычислена соответствующая стоимость.

При написании программы для решения транспортной задачи использовался метод потенциалов. Идея его состоит в следующем. Для любой свободной клетки транспортной таблицы существует единственный цикл, положительная вершина которого лежит в этой свободной клетке, а все остальные – в базисных. Если цена такого цикла отрицательна, то план можно улучшить перемещением перевозок по данному циклу. Количество единиц груза, которое можно переместить, определяется минимальным значением перевозок, стоящих в отрицательных вершинах цикла (если переместить большее число единиц груза, возникнут отрицательные перевозки). Если циклов с отрицательной ценой нет, то это означает, что дальнейшее улучшение плана невозможно, т.е. оптимальный план найден.

Транспортная задача характеризуется широтой применения, а также ее универсальностью (к данному типу задач могут быть сведены другие задачи линейного программирования). Для постановки транспортной задачи необходимо знать запасы Ai каждого i-го поставщика (количество поставщиков равно m), потребности Bj j-го получателя (количество получателей равно n), затраты на перевозку продукции (Cij) от i-го поставщика к j-му получателю. Предполагается, что транспортные расходы пропорциональны перевозимому количеству продукции, т.е. перевозка X единиц продукции вызывает расходы $X \bullet Cij$. Транспортная задача является задачей определения плана перевозок $(X) = Xij$, где Xij – количество единиц продукции, поставляемой по коммуникации i,j:

$$u_1 u_2 ... u_m, v_1 v_2 ... v_n . \qquad (7)$$

Целевой функцией можно считать суммарную стоимость всех перевозок. Результатом решения транспортной задачи является оптимальный план перевозок продукции от поставщиков к потребителям, при котором затраты будут минимальными:

$$u_i + v_j \le c_{ij}, \ j = \overline{1,n}, \ i = \overline{1,m} . \qquad (8)$$

Был разработан программный продукт, куда введены исходные данные: вместимость и грузоподъемность самолетов, количество самолетов разных типов, максимальное количество рейсов, стоимость эксплуатации одного самолета на авиалиниях:

$$T(u, v) = \sum_{i=1}^{m} a_i u_i \sum_{j=1}^{n} b_j u_j \to \max . \qquad (9)$$

Исходя из вычисленных оценок, в которых содержатся положительные оценки, делаем вывод о том, что данный опорный план не является оптимальным [4]. Номер ведущего столбца вычисляется из соотношения, так как рассматривается задача на минимизацию.

Дальнейшее решение предполагает использование итераций симплекс-метода для нахождения оптимального плана перевозок:

$$\begin{aligned}
&(30X_1 + 50X_2 + 28X_3) + (45X_4 + 55X_5 + 58X_6) + (55X_7 + \\
&28X_8 + 43X_9) + (45X_{10} + 63X_{11} + 80X_{12}) + (65X_{13} + \\
&76X_{14} + 39X_{15}) \Rightarrow \min; \\
&576X_1 + 352X_4 + 656X_7 + 600X_{10} + 1200X_{13} \ge 3500; \\
&480X_2 + 352X_5 + 820X_8 + 600X_{11} + 600X_{14} \ge 3000; \\
&576X_3 + 440X_6 + 820X_9 + 400X_{12} + 900X_{15} \ge 600; \\
&12X_1 + 8X_4 + 24X_7 + 30X_{10} + 32X_{13} \ge 80; \\
&10X_2 + 8X_5 + 30X_8 + 30X_{11} + 16X_{14} \ge 70; \\
&14X_3 + 10X_6 + 30X_9 + 20X_{12} + 24X_{15} \ge 65; \\
&X_1 + X_2 + X_3 \le 9; \\
&X_4 + X_5 + X_6 \le 9; \\
&X_7 + X_8 + X_9 \le 8; \\
&X_{10} + X_{11} + X_{12} \le 10{,}008; \\
&X_{13} + X_{14} + X_{15} \le 4{,}002; \\
&X_i \ge 0;
\end{aligned}$$

Для достижения оптимального плана потребовалось 12 итераций по улучшению опорного плана.

Как видно из решения, оптимальный план будет таким:

$$X = (0{,}666667; 8{,}333334; 0; 9; 0; 0; 0; 0; 8; 0; 0; 0; 0; 0; 0) .$$

Минимальное значение функции примет значение:

$$F(x^*) = 2323{,}67 \text{ млн. грн. / мес.}$$

Дробные значения искомых переменных означают неполную загрузку самолетов (например, в конце месяца). Следовательно, необходимо округлить полученные значения в большую сторону:

$$X = (1; 8; 0; 9; 0; 0; 0; 0; 8; 0; 0; 0; 0; 0; 0) .$$

Увеличившиеся затраты эксплуатации примут значение:

$$F(x^*) = 2324 \text{ млн. грн. / мес.}$$

В полученном результате не используются все типы самолетов, а только наиболее выгодные для каждой линии.

5. Эволюционные методы оптимизации

Наиболее актуальными среди эволюционных методов являются генетические алгоритмы (ГА). Они есть поисковые алгоритмы, основанные на механизмах натуральной селекции и натуральной генетики. Реализуют «выживание сильнейших» среди рассмотренных структур, формируя и изменяя поисковый алгоритм на основе моделирования эволюции поиска. В каждой генерации новое множество искусственных последовательностей создается, используя части старых и добавляя новые части с «хорошими свойствами». ГА – это не просто случайный поиск. Он эффективно использует информацию, накопленную в процессе эволюции.

Цель ГА двояка: абстрактно и формально объяснить адаптацию процессов в естественных системах; спроектировать искусственные программные системы, которые содержат механизмы естественных систем. Центральная система поиска в ГА – поиск баланса между эффективностью и качеством для выживания в различных условиях. ГА отличаются от других оптимизационных и поисковых процедур следующим: работают в основном не с параметрами, а с закодированным множеством параметров; осуществляют поиск из популяции точек, а не из единственной точки; используют целевую функцию, а не ее различные приращения для оценки информации; используют не детерминированные, а вероятностные правила.

ГА берет множество натуральных параметров оптимизационной проблемы и кодирует их как последовательность конечной длины в некотором конечном алфавите. В естественных системах общая генетическая упаковка называется генотип. В натуральных системах организм формируется посредством связи генетической упаковки с окружающей средой и называется фенотип. В естественной терминологии хромосомы состоят из генов, которые могут иметь числовые значения, называемые «аллели».

Начальное условие задачи – распределение транспортных средств. Необходимо закодировать это условие в хромосому. Для этого план перевозок нужно представить в виде развернутой строки. Генами в данном случае будут выступать элементы ячеек плана. При генерации популяции будем использовать случайные значения генов. Размер популяции для матрицы стоимостей размерности m на n элементов необходимо брать в районе $m*n$. Количество генов в хромосоме будет равняться $m*n$.

Фитнесс-функцией (целевой функцией) для популяции является суммарная стоимость перевозки всех грузов:

$$f(k)=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}c_{ij}x_{ij}\,. \tag{10}$$

Для каждой сгенерированной особи считаем значение целевой функции, после чего вычисляем отношение ее приспособленности к суммарной приспособленности популяции:

$$Ps(i)=\frac{f(k)}{\sum_{i=1}^{k}f(k)}. \tag{11}$$

Полученное значение определяет вероятность выбора особи для дальнейших операций – кроссинговера и мутации. К хромосомам с наилучшей фитнесс-функцией $(f(k)\to\min)$ применяется оператор кроссинговера, который заключается в попарном «скрещивании» выбранных на предыдущем этапе особей. Например, имея хромосомы $A=10,11,12,8,7$ и $B=1,2,3,4,5$, после применения к ним оператора кроссинговера мы получим хромосомы $C=10,11,12,4,5$ и $D=1,2,3,8,7$. После скрещивания применяем к отобранным хромосомам оператор мутации. Он заключается в случайном изменении одной или нескольких позиций в хромосоме. Например, хромосома $A=10,11,12,8,7$ после мутации может принять вид $A=10,8,12,11,7$.

Оператор кроссинговера применяется с вероятностью 60%, мутации – 40%. Как ни странно, именно вероятностный подход позволяет генетическим алгоритмам достигать оптимума в решаемой задаче.

Применив разработанный алгоритм к задаче транспортного типа, получили следующий результат: на каждой итерации особи в популяции улучшали свою целевую функцию, стремясь к оптимальному решению, и на четырнадцатой итерации было получено решение задачи, в то время как при использовании метода потенциалов оптимальное решение было найдено только на двадцать второй.

Рассмотренные вычислительные алгоритмы были исследованы и апробированы для различных типов транспортных задач [4,5].

6. Выводы

В результате выполнения работы решена поставленная задача распределения самолетов по авиалиниям. В качестве метода решения был выбран симплекс-метод. Рассмотрены понятия эволюционного подхода к решению задач и, в частности, разработан алгоритм решения оптимизационной задачи транспортного типа на основе генетических алгоритмов. В ходе исследования сделаны выводы о том, что несмотря на сложность программной реализации, новый алгоритм является более производительным и позволяет находить оптимальное решение за более короткий срок.

Научная новизна. В ходе исследования впервые применен эволюционный подход к рассматриваемому классу задач. Таким образом, создан первый алгоритм решения оптимизационных задач транспортного типа на основе генетических алгоритмов.

Практическим значением полученных результатов является то, что разработанным методом можно решать транспортные задачи на любом предприятии транспортного типа. В отличие от уже существующих методов решения новый алгоритм является более производительным и не требует закупки более дорогостоящей вычислительной техники.

Литература: 1. *Гвоздинский А.Н.* Разработка информационной подсистемы управления воздушным транспортом/ А.Н. Гвоздинский, Е.А. Гольцев // Радиоэлектроника и информатика. 2010. №2. С. 47-51. **2.** *Гвоздинський А.М.* Методи оптимізації в системах прийняття рішень: навчальний посібник /А.М. Гвоздинський, Н.А. Якімова, В.О. Губін // Харків : ХНУРЕ, 2006 С.325. **3.** *Гвоздинский А.Н.* Эволюционный подход к решению оптимизационных задач транспортного типа // А.Н. Гвоздинский, С.В. Мельник // АСУ и приборы автоматики. 2009. №147. С. 76-80. **4.** *Гвоздинский А.Н.* Об одном подходе к решению задач составления расписания в системах управления объектами транспортного типа. / А.Н. Гвоздинский, А.А. Куликова // АСУ и приборы автоматики. 2010. №150. С. 101-106. **5.** *Гвоздинский А.Н.* Исследование и разработка методов решения задач закрепления потребителей за поставщиками с учетом возврата транспортных средств. / А.Н. Гвоздинский, М.А. Гаврюшенко // АСУ и приборы автоматики. 2010. №150. С.106-111.

Transliterated bibliography:

1. *Gvozdinskiy A.N.* Razrabotka informatsionnoy podsistemyi upravleniya vozdushnyim transportom/ A.N. Gvozdinskiy, E.A. Goltsev // Radioelektronika i informatika. 2010. #2. S. 47-51.

2. *Hvozdyns'kyy A.M.* Metody optymizatsiyi v systemakh pryynyattya rishen': navchal'nyy posibnyk /A.M. Hvozdyns'kyy, N.A. Yakimova, V.O. Hubin // Kharkiv : KhNURE, 2006 S.325.

3. *Gvozdinskiy A.N.* Evolyutsionnyiy podhod k resheniyu optimizatsionnyih zadach transportnogo tipa // A.N. Gvozdinskiy, S.V. Melnik // ASU i priboryi avtomatiki. 2009. #147. S. 76-80.

4. *Gvozdinskiy A.N.* Ob odnom podhode k resheniyu zadach sostavleniya raspisaniya v sistemah upravleniya ob'ektami transportnogo tipa. / A.N. Gvozdinskiy, A.A. Kulikova // ASU i priboryi avtomatiki. 2010. #150. S. 101-106.

5. *Gvozdinskiy A.N.* Issledovanie i razrabotka metodov resheniya zadach zakrepleniya potrebiteley za postavschikami s uchetom vozvrata transportnyih sredstv. / A.N. Gvozdinskiy, M.A. Gavryushenko // ASU i priboryi avtomatiki. 2010. #150. S.106-111.

Поступила в редколлегию 23.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Путятин Е.П.

Гвоздинский Анатолий Николаевич, канд. техн. наук, профессор кафедры искусственного интеллекта ХНУРЭ. Научные интересы: оптимизация процедур принятия решений в сложных системах управления. Адрес: Украина, 61166, Харьков, ул. акад. Ляпунова, 7, кв. 9, тел. 32-69-08.

Закутний Сергей Валерьевич, студент группы СА-14-1 ХНУРЭ. Научные интересы: программирование, математическая статистика. Адрес: Украина, 61202, Харьков, ул.Целиноградская,58.