

Лебедева Ольга Анатольевна,  
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: kravhome@mail.ru

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕТИ ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ АДДИТИВНОГО МЕТОДА

Lebedeva O.A.

### DESIGNING NETWORK OF CITY PUBLIC TRANSPORT ON THE BASIS OF ADDITIVE METHOD

**Аннотация.** В статье приведены основные особенности модели оптимизации, которая может использоваться для проектирования сети городского общественного транспорта. Задача решается с помощью модели, позволяющей перепроектировать часть сети или всю сеть в целом. Модель состоит из аддитивной процедуры, в которой решение о включении маршрута в сеть или увеличении интервала движения основано на экономическом критерии. Основным преимуществом модели является то, что задача проектирования решается только с помощью процесса оптимизации, который не требует применения специального программного обеспечения. Результаты исследования приведены в статье.

**Ключевые слова:** проектирование маршрутной сети, оптимизация, городской транспорт, аддитивный метод.

**Abstract.** The article describes the main features of the optimization model, which can be used to design a network of urban public transport. Design tasks can be solved using a model that allows you to redesign a part of the network or the entire network as a whole. The model consists of an additive procedure in which the decision to include a route in the network or increase the interval of movement is based on an economic criterion - an estimate of the Lagrange multiplier for the optimization problem. The main advantage of the model is that the design problem is solved only through the optimization process. The optimization process remains understandable, and the model does not require the use of special software. The simulation results are given in the article.

**Keywords:** route network design, optimization, urban transport.

В связи с изменением экономической ситуации в мире – финансовые ограничения, применяемые для общественного транспорта, требуют нахождения менее затратных путей решения задачи проектирования сети. Она может быть сформулирована следующим образом: определение маршрутов и интервалов движения городского пассажирского транспорта для максимально возможного удовлетворения спроса населения на перевозки, учитывая финансовые ограничения [1].

Для проектирования сети в основном используются модели оценки, в которых матрица корреспонденцией (OD) составляется с учетом ограничений транспортной системы и производится оценка всех характеристик [2,3].

В последние два десятилетия были разработаны следующие виды оптимизационных моделей для проектирования сетей общественного транспорта. Эти модели можно условно разделить на шесть групп [4-6]:

- аналитические модели – используют упрощенные сети для получения оптимальных соотношений параметров системы городского общественного

транспорта (движение на маршруте и расстояние между остановочными пунктами);

- модели, определяющие, какие пути следует использовать для построения маршрутной сети городского общественного транспорта;
- модели составления маршрутов без учета интервалов движения;
- модели, назначающие интервал заданному набору маршрутов;
- двух этапные модели, определяющие проложение маршрута на первом этапе и назначающие интервал на втором этапе;
- модели, одновременно определяющие проложение маршрута и интервал движения.

Первые два варианта не определяют ни маршруты, ни интервалы и поэтому не подходят для решения задач. Третий и четвертый находят только один из требуемых показателей. Для решения задачи проектирования сети подходят только два последних варианта.

Необходимость оптимизировать процесс проектирования сети на реальных данных является причиной разработки новой модели. Такая модель может использоваться в качестве инструмента проектирования, и должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Решение задач проектирования для краткосрочного и долгосрочного периода, например, при определении интервалов движения, проектировании части или всей сети.

2. Доступность для пользователей.

Для удовлетворения поставленной цели необходима взаимосвязь между спросом и предложением на услуги общественного транспорта. Поэтому сформулированная модель прямого спроса, основана на одновременном распределении. Соотношение между спросом и предложением на общественный транспорт описывается функцией сдерживания.

Модель может быть сформулирована как [7]:

$$T_{ij} = r \times o_i \times d_j \times F_{ij} \quad \forall i, j \quad (1)$$

где  $T_{ij}$  – количество ездов между узлами  $i$  и  $j$ ;  $r$  – постоянный член;  $o_i$  – коэффициент генерации узла  $i$ ;  $d_j$  – коэффициент притяжения узла  $j$ ;  $F_{ij}$  – значение функции для всех OD-пар  $i - j$ .

Ограничение:

$$\sum_i T_{ij} = D_j \quad \forall j \quad \text{и} \quad \sum_j T_{ij} = o_i \quad \forall i \quad (2)$$

где  $D_j$  – прибытие в пункт  $j$ ,  $O$  – выезд из пункта  $i$ .

$F_{ij}$  можно записать как:

$$F_{ij} = \sum_v [F_v(C_{ijv})] \quad \forall i, j \quad (3)$$

где  $F_v$  – функция сдерживания для варианта  $v$ ,  $C_{ijv}$  – обобщенные затраты для OD-пары  $i-j$  при использовании варианта  $v$ .

Количество поездок на общественном транспорте можно рассчитать:

$$T_{ijp} = T_{ij} \times \frac{F_p(C_{ijp})}{F_{ij}} = r \times o_i \times d_j \times F_p(C_{ijp}) \forall i, j \quad (4)$$

где  $T_{ijp}$  – количество поездок на общественном транспорте между узлами;  $F_p$  – функция сдерживания для общественного транспорта;  $C_{ijp}$  – обобщенные затраты на OD пару.

Предполагается, что изменения в системе общественного транспорта повлияют на количество поездок, но не изменят ни общее количество поездок для пар OD, ни значение функции сдерживания. В случае крупномасштабных изменений (строительство новых жилых районов) следует использовать модель прогнозирования транспортных потоков для расчета значений OD.

В рассматриваемом наборе возможных маршрутов  $Y$  учитываются следующие характеристики:  $f_y$  – интервал движения на маршруте  $y$ ; тип транспортного средства  $S_y$ , используемого на маршруте  $y$  (автобус, трамвай); набор узлов  $N_Y$ , соединенных маршрутом  $y$ ; время движения в транспортном средстве  $T_Y$  между узлами набора  $N_Y$ .

Цель состоит в том, чтобы максимально увеличить количество пассажиров городского общественного транспорта, которые могут осуществлять процесс перемещения без пересадок:

$$\max_{f_y} \sum_i \{ \sum_j [r \times o_i \times d_j \times F_p(C_{ijp})] \} \quad (5)$$

Обобщенные затраты для OD-пары определяются набором маршрутов  $S_{ij}$ , которые предлагают поездку без пересадки для OD-пары. Следовательно:

$$F_p(C_{ijp}) = G(S_{ij}) \quad (6)$$

где  $S_{ij}$  – набор маршрутов с  $i \in N_Y$ ,  $j \in N_Y$  и  $f_y \geq 0$  для  $\forall y \in S_{ij}$  и  $S_{ij} \in Y$ .

При подстановке уравнения (6) в (5), получаем выражение (7):

$$\max_{f_y} \sum_i \{ \sum_j [r \times o_i \times d_j \times G(S_{ij})] \} \quad (7)$$

Описание системы общественного транспорта приводит к сложной аналитической постановке задачи. Для исследования используется более подходящая формулировка – экспоненциальная функция  $F_p$ :

$$F_p = a \times \exp[-b \times (C_{ijp} + c)] \quad (8)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  - коэффициенты.

Обобщенные затраты могут быть записаны как:

$$C_{ijp} = g_{ij} + (60 \times h) / \left[ \sum_{y \in S_{ij}} f_y \right] \quad (9)$$

где  $g_{ij}$  – константа для OD-пары, определяемая временем ожидания и поездки;  $h$  – параметр для расчета времени ожидания (включая вес времени ожидания).

Для описания обобщенных затрат нескольких маршрутов, доступных для OD-пары, можно записать в виде:

$$\max_{f_y} \sum_i \left\{ \sum_j \left[ r \times o_i \times d_j \times a \times \exp \left\{ -b \times \left[ g_{ij} + \left[ 60 \times \frac{h}{\left( \sum_{y \in S_{ij}} (f_y) \right)} + c \right] \right] \right\} \right] \right\} \quad (10)$$

Ограничениями задачи являются: доступный бюджет (S1); количество транспортных средств (S2); интервалы движения (S3); целочисленное ограничение на количество транспортных средств (S4). Эти ограничения могут быть записаны как:

$$S1: \sum_s \{k_s \times [\sum_y (nv_y \times b_y)]\} \leq K \quad (11)$$

где  $K$  – доступный бюджет,  $nv_y$  – количество транспортных средств, необходимых на маршруте  $y$ ,  $b_y$  – двоичная переменная, которая указывает, будет ли маршрут  $y$  включен в суммирование ( $b_y = 1$ , если  $s_y = s$ ; в противном случае  $b_y = 0$ );  $k_s$  – коэффициент затрат на использование транспортного средства типа  $s$ .

$$S2: \sum_y (nv_y \times b_y) \leq mnv_s \quad \forall s \quad (12)$$

где  $mnv_s$  – доступное количество типов транспортных средств.

$$S3: f_y \in f \quad \forall y \quad (13)$$

где  $f$  – набор возможных интервалов движения (целых) частот.

$$S4: nv_y - 1 < (f_y \times nvf_y) \leq ny_y \quad (14)$$

где  $nvf_y$  – количество транспортных средств, которое необходимо для интервала одно транспортное средство в час на маршруте  $y$ .

Сформулированная задача – нелинейная, но имеет линейные ограничения и множество целочисленных переменных. Так как существует четкая связь между маршрутами и интервалами движения, необходимо определить их одновременно. Поэтому предлагается следующий метод.

1. Все интервалы движения принимаются равными 0 и определяются элементами набора  $s_{ij}$ .

2. Для каждого маршрута  $y$  определяется эффективность увеличения интервала движения, рассчитанная как соотношение количества дополнительных пассажиров к необходимым затратам:

$$r_y = \frac{\sum_m \{ \sum_n [r \times o_m \times d_n \times G(S_{mn2})] \} - \sum_m \{ \sum_n [r \times o_m \times d_n \times G(S_{mn1})] \}}{k_{s_y} \times nvf_y \times (f_{y2} - f_{y1})} \quad (14)$$

где  $r_y$  – эффективность маршрута  $y$ ;  $S_{mn1}$  – набор маршрутов, доступных для OD-пары  $m$ - $n$ ,  $f_y = f_{y1}$ ;  $S_{mn2}$  – набор маршрутов, доступных для OD-пары  $m$ - $n$ ,  $f_y = f_{y2}$ ;  $k_s$  – коэффициент затрат на использование транспортного средства типа  $s$  ( $s = s_y$ ).

2. Выбирается маршрут с самым высоким коэффициентом полезного действия и увеличивается его интервал движения.

3. Проверяются ограничения S1 и S2, если они больше не повторяются, процесс прекращается; в противном случае происходит переход ко второму шагу.

Особенностью метода является возможность сравнения маршрутов с фиксированными интервалами. Задача оптимизации ограничена условием, что пассажиры выбирают поездки без пересадок. Поскольку метод может быть использован для решения нескольких задач проектирования, необходимо учитывать два аспекта: выбор интервала движения и маршрутов. Оба аспекта учтены

в уравнении (10). В случае, когда ограничение касается только выбора интервалов движения, возможно использование альтернативного метода решения. Ограничение (11) вводится в функцию (10), получаем уравнение Лагранжа.

Применение аддитивного метода может отрицательно повлиять на качество эксперимента, для его повышения необходимо введение процедуры основанной на оценке множителя Лагранжа  $\mu$  с проверкой оптимальности. При нахождении оптимального решения, улучшить его таким способом невозможно, поскольку эффективность маршрутов будет одинаковой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Полтавская Ю.О., Лебедева О.А. Оценка качества обслуживания пассажиров общественным транспортом // Научные исследования и разработки молодых ученых. 2014. №1. С. 110-113.

2. Лебедева О.А. Математические модели оценки матрицы корреспонденций на основе данных детектора «вход – выход» подвижного состава городского пассажирского транспорта / О.А. Лебедева // Вестник ИрГТУ. – 2012. – № 2(61). – С. 66–68.

3. Лебедева О.А. Сравнительный анализ методов оценки межостановочной матрицы корреспонденций / О.А. Лебедева, А.Ю. Михайлов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. – № 4(40). – С. 85–88.

4. E. M. Holroyd. The Optimum Bus Service: a Theoretical Model for a Large Uniform area, 3rd OECD Int. Symp. Theory of Road Traffic Flow, pp. 308-328, 1967.

5. G. Kocur and C. Hendrickson. Demand of Local Bus Service with Demand Equilibration, Transportation Science, Vol. 16, No. 2, pp. 149-170, 1982.

6. J. W. Billheimer and P. Gray. Network Design with Variable and Fixed Cost Elements. Transportation Science, Vol. 7, No. 1, pp. 49-74, 1973.

7. R. van Nes. Design of public transport networks. Transportation research record 1202 pp. 74-83.