

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

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МАРШРУТОВ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ДЛЯ ГОРОДСКОЙ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ГРАФОВ

Lebedeva O.A.

DESIGNING EFFECTIVE ROUTES OF PASSENGER TRANSPORT FOR THE CITY NETWORK USING GRAPH THEORY

Аннотация. В статье рассматривается задача проектирования транспортной сети с применением теории графов. Модель должна стать инструментом, позволяющим проектировать сеть с определением эффективного набора маршрутов, которые дают возможность скоординировать расходы пассажиров и перевозчиков. Как правило, пассажирам необходимо добраться до места назначения в кратчайшие сроки, с минимальным количеством пересадок. Затраты перевозчика зависят от многих факторов, таких как количество транспортных средств, необходимых для поддержания требуемого уровня обслуживания, пробег подвижного состава, расходы на оплату труда водителей. В целом, в исследовании предлагается вариант проектирования сети городского общественного транспорта, что нашло отражение в модели оптимизации затрат перевозчиков и пассажиров, которая может быть адаптирована к реальным маршрутам за счет ограничений.

Ключевые слова: маршрут, оптимизация, транспортная сеть, граф.

Abstract. The article discusses the problem of designing a transport network using graph theory. The model should be a tool to design a network with the definition of an effective set of routes that make it possible to coordinate the costs of passengers and carriers. As a rule, passengers need to get to their destination in the shortest possible time, with a minimum number of transfers. Carrier costs depend on many factors, such as the number of vehicles required to maintain the required level of service, rolling stock mileage, and labor costs for drivers. In general, the study proposes a design option for the urban public transport network, which is reflected in the cost-optimization model for carriers and passengers, which can be adapted to real routes due to constraints.

Keywords: route, optimization, transport network, graph.

Общественный транспорт является ключевым элементом инфраструктуры, обеспечивающий экономические, социальные и экологические аспекты, необходимые для развития городской среды. Транспортная система состоит из нескольких компонентов транспортного потока (автобусов, автомобилей, мотоциклов и велосипедов) и логистических организаций, которые организуют сбор и доставку грузов до подвижного состава, и позволяют удовлетворять потребности населения, в перевозочном процессе поддерживая инфраструктуру городов.

В городских транспортных системах индивидуальный автомобиль стал доминирующим средством передвижения по нескольким причинам:

- сложность прогнозирования точного времени в пути при использовании общественного транспорта из-за непредвиденных задержек (высока вероятность несоблюдения расписания);
- уменьшение времени в пути за счет использования индивидуального транспорта, в сравнении с общественным;
- возможность координировать время отправления и прибытия;
- безопасность при ожидании общественного транспорта (передвижения в вечернее время);
- необходимость совершать пересадки при использовании общественного транспорта приводит к дополнительному времени ожидания и снижает уровень комфорта поездки;
- длительный пеший подход к остановочным пунктам общественного транспорта.

Несмотря на вышеуказанные недостатки роль общественного транспорта в процессе передвижения велика. С использованием общественного транспорта, возможно, решить многие задачи, с которыми сталкивается современная городская транспортная система [1, 2, 3]. Увеличение пассажиропотоков на общественном транспорте приведет к: уменьшению количества транспортных средств на улично-дорожной сети; сокращению времени в пути из-за устранения части транспортных заторов; положительному влиянию на динамику выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду.

Общественный транспорт в городской местности может состоять из нескольких видов, включая поезда, трамваи, автобусы и метрополитен. Скоординированный подход с использованием различных вариантов передвижения может сократить время ожидания при пересадке, уменьшив общее время поездки.

Процесс проектирования сети тесно связан с определением эффективного набора маршрутов, которые позволят скоординировать расходы пассажиров и перевозчиков [4, 5]. В общем виде транспортная сеть представляется в виде графа со смежными вершинами (остановочными пунктами) связанными с ребром. Маршрут – это объединение ряда смежных вершин, которые образуют путь. Набор формируется путем объединения нескольких маршрутов.

В постановке задачи набор маршрутов должен содержать все вершины, присутствующие в транспортной сети, но не может содержать все ребра, то есть объединение всех маршрутов в набор должно образовывать охватывающий подграф транспортной сети. Однако, если несколько перевозчиков обслуживают один район, то вершины уже обслуживаемые другим перевозчиком могут быть удалены из транспортной сети. Каждый маршрут должен иметь хотя бы одну общую вершину с другим маршрутом, что позволит при необходимости обслуживать все маршруты (вершины в сети).

Спрос – это количество пассажиров, которым необходимо осуществить поездку из одной точки сети в другую. Точную оценку спроса трудно получить,

так как он варьируется в зависимости от времени суток, дня недели и сезона. Его можно оценить несколькими способами: проведя анализ статистики по проданным билетам, опроса местного населения или с помощью автоматизированных методов мониторинга. Данные по пассажиропотоку дают возможность решить задачу определения количества подвижного состава на маршруте, учитывая вместимость транспортных средств.

Эффективным набор маршрутов считается в том случае, если [6]:

1. Все требования удовлетворены, и пассажиры могут добраться до места назначения в пределах запланированного количества пересадок (не более двух).

2. Большая часть спроса удовлетворяется без пересадок.

3. Небольшое среднее время в пути на одного пассажира.

4. Расстановка приоритетов для наиболее востребованных маршрутов.

На рисунке 1 приведены варианты представления маршрутной сети в реальной транспортной системе: (a) неверный вариант оптимизации маршрутной сети (b), и оптимальная маршрутная сеть (c).

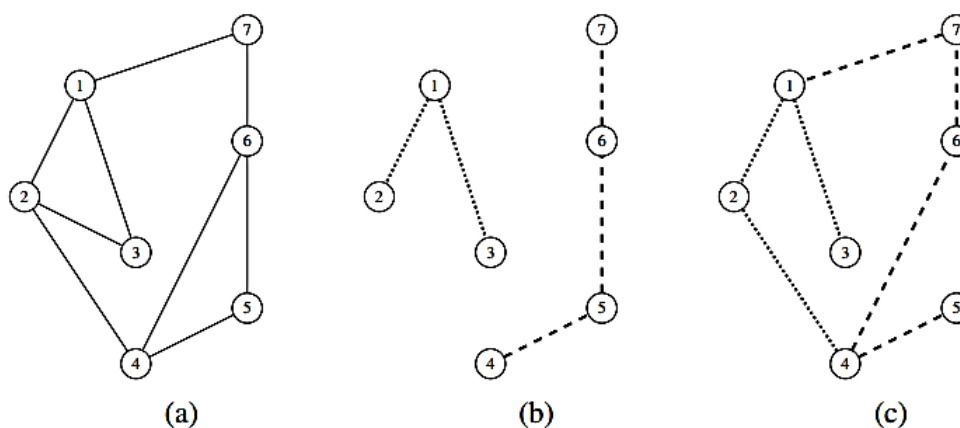


Рисунок 1 – Примеры представления маршрутной сети: фактическая маршрутная сеть (a); неверный вариант оптимизации маршрутной сети (b); оптимальная маршрутная сеть (c).

Задача проектирования сети может быть сформулирована следующим образом. Дан граф $G = (V, E, W)$, где $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ – множество вершин, $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ – множество ребер и $W = \{w_1, \dots, w_m\}$ набор весов, которые определяют стоимость прохождения ребра e_i . Также известна матрица $D_{n \times n}$, где D_{v_i, v_j} требования пассажиров между парой вершин v_i и v_j .

Маршрут R_i определяется как путь без повторяющихся вершин через граф G . Пусть $G_{R_i} = (V_{R_i}, E_{R_i})$ будет подграфом маршрута R_i . Решение состоит из набора перекрывающихся маршрутов $R = \{R_1, \dots, R_r\}$, где количество маршрутов

r , минимальное m_1 и максимальное m_2 количество вершин определяются в зависимости от конфигурации сети. Для того чтобы апробировать R на реальной сети, должны выполняться следующие условия:

$$\bigcup_{i=1}^{|R|} V_{Ri} = V \quad (1)$$

$$m_1 \leq |V_{Ri}| \leq m_2 \forall R_i \in R \quad (2)$$

$$\forall R_i \in R \exists R_j \in R R_i \cap R_j \neq \emptyset \quad (3)$$

$$G_R = (\bigcup_{i=1}^{|R|} V_{Ri}, \bigcup_{i=1}^{|R|} E_{Ri}) \quad (4)$$

$$|R| = r \quad (5)$$

Ограничение 1 указывает, что все вершины V входят хотя бы в один маршрут R , а ограничение 2 – что каждый маршрут должен находиться между вершинами m_1 и m_2 (безопасность пассажиров, относительно допустимого времени работы водителя). Ограничение 3 – каждый маршрут имеет, по крайней мере, одну общую вершину с другим маршрутом, что позволяет осуществлять обслуживание пассажиров по разным направлениям. Ограничение 4 – между каждой парой вершин G_R должен существовать хотя бы один путь проезда. Ограничение 5 – решение содержит необходимое количество маршрутов r .

Для решения задачи сделаны следующие предположения:

1. Транспортное средство движется по одному и тому же маршруту, меняя свое направление каждый раз, когда достигает конечных вершин. Пересекаемые участки улично-дорожной сети могут отличаться в прямом и обратном направлении из-за улиц с односторонним движением, требуя нахождения альтернативного пути.

2. Выбор маршрутов между любыми двумя вершинами основан только на кратчайшем времени в пути.

3. На каждом маршруте $R_i \in R$ количество транспортных средств обеспечивает удовлетворение спроса между каждой парой вершин на маршруте.

4. Штраф за пересадку устанавливается как постоянная константа.

При решении задачи учитывается как стоимость поездки для пассажиров, так и стоимость затрат для перевозчика. Как правило, пассажирам необходимо добраться до места назначения в кратчайшие сроки, с минимальным количеством пересадок. Обозначим кратчайшее время, необходимое для прохождения между двумя вершинами в наборе маршрутов R , через $\alpha_{vi}, v_j(R)$.

Маршрутная сеть может включать в себя как пути следования, так и участки где возможна пересадка. Это показано в расширенной сети с включением вершин и ребер для пересадки. Таким образом, оценка кратчайшего пути завершается в транспортной сети (рисунок 2).

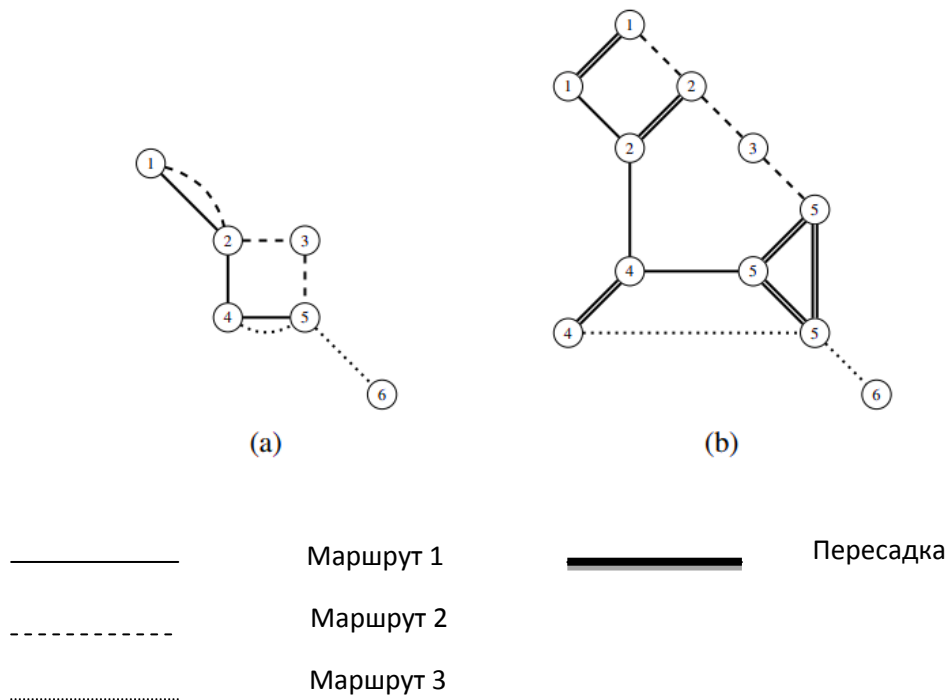


Рисунок 2 – Исходная маршрутная сеть (a); маршрутная сеть с наложением трех маршрутов (b).

Таким образом, минимальное время в пути $a_{vi, vj}(R)$ из любой заданной пары вершин состоит из суммы двух компонентов: времени в пути и штрафа за пересадку. Стоимость затрат пассажиров для набора маршрутов R определяется как среднее время в пути для всех пассажиров:

$$F_1(R) = \frac{\sum_{i,j=1}^n D_{vi,vj} a_{vi,vj}(R)}{\sum_{i,j=1}^n D_{vi,vj}} \quad (6)$$

Затраты перевозчика зависят от многих факторов, таких как количество транспортных средств, необходимых для поддержания требуемого уровня обслуживания, пробег подвижного состава, расходы на оплату труда водителей. Перевозчики применяют более короткие маршруты из-за простоты составления расписания и планирования, тогда как пассажиры предпочитают более длинные маршруты. Очевидно, что более длинные маршруты включают в себя больше вершин, что обеспечивает увеличение количества пассажиров, которые могут добраться до пункта назначения без пересадок, что приводит к снижению среднего времени в пути. Для расчета затрат перевозчика $F_2(R)$ используется сумма затрат (во времени) для прохождения всех маршрутов в одном направлении:

$$F_2(R) = \sum_{\forall R_i \in R} \sum_{\forall e_j \in E_{R_i}} W_j \quad (7)$$

Вариант нахождения затрат перевозчика F_2 может показаться слишком упрощенным, но при апробации такая модель дает достаточно достоверные значения. Сумма длин маршрута может быть использована для определения количества транспортных средств, необходимых для поддержания определенного уровня обслуживания, при условии, что принимается постоянный интервал на всех маршрутах.

В целом, в исследовании предлагается вариант проектирования сети городского общественного транспорта с использованием теории графов, что нашло отражение в модели оптимизации затрат перевозчиков и пассажиров, которая может быть адаптирована к реальным маршрутам за счет ограничений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедева О.А. Вопросы функционирования городского пассажирского транспорта // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2013. Т. 1. С. 40.
2. Лебедева О.А. Показатели оценки эффективности работы общественного транспорта // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2018. Т. 1. С. 108-109.
3. Полтавская Ю.О., Лебедева О.А. Оценка качества обслуживания пассажиров общественным транспортом// Научные исследования и разработки молодых ученых. 2014. №1. С. 110-113.
4. Копылова Т.А., Михайлов А.Ю. Разработка оценочной шкалы затрат времени на пересадку // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: мат-лы XXII Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2016. С. 352–357.
5. Копылова Т.А., Михайлов А.Ю. Оценка функционирования интермодальных узлов городского пассажирского транспорта // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства: сб. науч. трудов Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск, 2016. С. 528–532.
6. Matthew P. John. Metaheuristics for Designing Efficient Routes and Schedules For Urban Transportation Networks, 2016, p.18-22.