

УДК 656.012

UDC 656.012

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК И УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМ РЕСУРСОМ МАРШРУТНЫХ ТАКСИ В СЛОЖНОЙ СИСТЕМЕ МЕГАПОЛИСА****MODELING OF PASSENGER TRANSPORTATIONS AND MANAGEMENT BY THE TRANSPORT RESOURCE OF ROUTING TAXI IN DIFFICULT SYSTEM OF THE MEGAPOLICY**

Волков Владимир Сергеевич  
д.т.н., профессор

*Воронежская государственная лесотехническая академия, Воронеж, Россия*

Volkov Vladimir Sergeevich  
Dr.Sci.Tech., professor

*Voronezh State Academy of Forestry and Technologies, Voronezh, Russia*

Представлен вариант решения задачи управления транспортным ресурсом автобусов на основе текущей информации о состоянии маршрута. Учитывается реальная скорость движения транспорта, изменения числа пассажиров. Рассматриваемая задача относится к классу экстремальных задач на сетях и усложнена набором ограничений

The variant of the decision of a task of management of a transport resource of buses is submitted on the basis of the current information on a condition of a route. The real speed of movement of transport, change of number of the passengers is taken into account. The considered task concerns to a class of extreme tasks on networks and is complicated by a set of restrictions

Ключевые слова: ОРГАНИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ, ПЕРЕВОЗКА, ОПТИМИЗАЦИЯ

Keywords: ORGANIZATION, MANAGEMENT, TRANSPORTATION, OPTIMIZATION

При управлении транспортным ресурсом при перевозках маршрутными такси важным является такой фактор как неравномерность пассажиропотока по участкам маршрута, который может различаться в разы [1-3]. Поэтому при определении количества транспортных единиц, обеспечивающих требуемый уровень обслуживания пассажиропотоков маршрута  $\alpha$ , будем исходить из необходимости разгрузить наиболее загруженного участка маршрута.

Пусть определены маршруты транспортной сети  $\alpha = \overline{1, L}$ , матрицы корреспонденций каждого маршрута  $\lambda_\alpha = \|\lambda_{\alpha ij}\|$ , характеристики транспортного ресурса и требуется произвести расчет количества транспортных единиц для маршрута  $\alpha$ . Допустим, имеется кольцевой маршрут (общий случай). Остановочный пункт с номером 1 является конечным, т.е. при поступлении в него любой транспортной единицы маршрута  $\alpha$  все пассажиры покидают ее. Учитывая специфику работы маршрутных такси в условиях необозначенных промежуточных остановок, пассажиропоток целесообраз-

ней приводить к участкам длиной один километр. Рассчитаем число транспортных единиц (ТЕ) для наиболее загруженного участка маршрута. Для этого определим максимальный пассажиропоток  $\lambda_{\alpha \max}$ , который может сформироваться на любом из участков маршрута  $\alpha$ . Тогда, суммарный пассажиропоток на первом километре маршрута:

$$I_{1a}^{\Sigma} = I_{12a} + I_{13a} + \dots + I_{1Na} = \sum_{j=2}^{N_a} I_{1ja} \quad (1)$$

Рассчитаем суммарный пассажиропоток  $\lambda_{\Sigma}$  на участке маршрута  $\alpha$  между  $m$  и  $(m+1)$  километрами:

$$\lambda_m^{\Sigma} = \sum_{j=m+1}^N \sum_{i=1}^m \lambda_{ij\alpha} + \sum_{i=2}^m \lambda_{i1\alpha} \quad (2)$$

Рассчитаем суммарный пассажиропоток на отрезке маршрута между  $N$  километром и конечной остановкой:

$$\lambda_{N_{\alpha}\alpha}^{\Sigma} = \lambda_{21\alpha} + \lambda_{31\alpha} + \dots + \lambda_{N_{\alpha}1\alpha} = \sum_{i=2}^N \lambda_{i1\alpha} \quad (3)$$

На основании выражений (2,3) получаем формулу для расчета суммарного пассажиропотока ( $\lambda_{\Sigma}$ ) на отрезке маршрута  $\alpha$  между  $m$  километром и любым за ним  $m^*$ :

$$\lambda_{m\alpha}^{\Sigma} = \begin{cases} \sum_{j=m+1}^{N_{\alpha}} \sum_{i=1}^m \lambda_{ij\alpha} + \sum_{i=2}^m \lambda_{i1\alpha}, & \text{for } m < N_{\alpha}, m = \overline{1, N_a} \\ \sum_{i=2}^{N_{\alpha}} \lambda_{i1\alpha}, & \text{for } m = N_{\alpha} \end{cases} \quad (4)$$

Километр  $m^*$ , следующего за километром с номером  $m$ , определяется на основании следующего выражения:

$$m^* = \begin{cases} m = 1, & \text{for } m < N_{\alpha}, \\ 1, & \text{for } m = N_{\alpha}, \end{cases} \quad m = \overline{1, N_{\alpha}} \quad (5)$$

Определим максимальный суммарный пассажиропоток  $\lambda_{\alpha \max}$ , формирующийся на наиболее загруженном участке маршрута  $\alpha$  транспортной сети:

$$\lambda_{\alpha \max} = \max \left\{ \lambda_{m\alpha}^{\Sigma} \right\}, \text{ для } m = \overline{1, N}. \quad (6)$$

С учетом выше изложенного, формула для определения оптимального количества ТЕ для  $i$ -го часа наряда ( $A_{pч}$ ) на маршруте принимает вид:

$$A_{pч} = \frac{\lambda_{\alpha \max} \times L_{об}}{60 q \times v_{ч}}, \quad (7)$$

где  $L_{об}$  – длина оборотного рейса, км;  $q$  – пассажироместимость, чел.;  $v_{ч}$  – фактическая скорость движения маршрутного такси для  $i$ -го часа, км/ч.

На основании формулы (7) получим выражение для определения интервала движения маршрутных такси ( $I_{pч}$ ):

$$I_{pч} = \frac{60 \times t_{об}}{A_{pч}} = \frac{60 \times L_{об}}{A_{pч} \times v_{ч}}, \quad (8)$$

Использование формул 7 и 8 позволяет более гибко и эффективно управлять транспортным ресурсом маршрутных такси работающих на линии, а именно: 1) Сравнить расчетное количество автобусов с их числом на АТП и принять соответствующие решения; 2) Назначить оптимальный интервал движения маршрутных такси, обеспечивающий сочетание интересов АТП и пассажиров для каждого часа наряда; 3) При малом интервале и большом количестве автобусов (расчетных) принять решение о применении подвижного состава с большей пассажироместимостью; 4) учесть влияние скорости движения автобуса на маршруте и длину оборотного рейса; 5) увеличить коэффициент наполнения; 6) уменьшить число отказов в перевозке; 7) сократить затраты АТП; 8) повысить качество обслуживания населения, безопасность и экологичность.

Модель задачи принятия решения с большим числом критериев можно представить в виде следующего кортежа:

$$\langle t, X, K, S, f, P, r \rangle, \quad (9)$$

где  $t$  – постановка (тип) задачи принятия решения;  $X$  – множество допустимых решений (альтернатив);  $K$  – множество критериев;  $S$  – множество шкал критериев;  $f$  – отображение множества допустимых решений во множестве векторных оценок;  $P$  – система предпочтений ЛПП;  $r$  – решающее правило.

При наличии сбоев в транспортной сети, связанных с невозможностью нормального функционирования действующего маршрута вследствие блокирования пути перемещения транспортной единицы между двумя и более остановочными пунктами (затор, реконструкция дороги и т.д.) возникает необходимость в формировании нового маршрута, в состав которого могут входить как остановочные пункты временно блокируемых маршрутов, так и не относящиеся к ним. Допустим представлен пример маршрута  $\alpha$  транспортной сети с заблокированным отрезком пути между остановочными пунктами с номерами  $C_i$  и  $C_j$ . В результате нарушается нормальное функционирование данного маршрута, т. к. становится невозможным создание замкнутого цикла движения транспортных единиц между конечными остановочными пунктами.

Возникает необходимость принятия оперативного управленческого решения по корректировке маршрута движения.

Задача поиска оптимального пути заключается в нахождении наилучшей (с точки зрения конкретного критерия) последовательности элементов транспортной сети (улиц, перекрестков), через которые должно пройти новый маршрут. При этом надо учитывать все ограничения накладываемые правилами дорожного движения, характеристиками магистрали, интенсивностью движения и т. д.

Разработанная подсистема поиска оптимального пути между точками разрыва действующего маршрута предназначена для решения двух основных задач: помощь водителю в выборе экономичного пути (по кон-

критерию), и обеспечения оптимальных алгоритмов планирования пассажирских перевозок.

Учитывая ситуационный характер возникновения сбоев в маршрутной сети, является очень важным быстрота алгоритма поиска пути.

Поэтому главными требованиями к модели поиска оптимального пути будем считать[4]: 1) адекватное представление структуры дорожной сети и её характеристик; 2) возможность обновления данных о структуре дорожной сети, её характеристик; 3) учет суточных, недельных и сезонных колебаний загруженности дорог.

Данные о текущей ситуации можно получать из сообщений водителей, от служб наблюдения, городских АСУДД и систем типа ГЛОНАСС.

В соответствии с выбранной задачей должен быть найден маршрут по следующим критериям: длине пути, времени поездки, длине пути с доставкой пассажиров, времени поездки с доставкой пассажиров.

В последних двух случаях под доставкой пассажиров понимаем то, что новый маршрут должен быть разработан с учетом мест высадки удобной для пассажиров.

Математически задача может быть представлена в виде целевой функции:

$$F(L_1(X_1, X_2 \dots X_N), T_1(X_1, X_2 \dots X_N), L_2(X_1, X_2 \dots X_N), T_2(X_1, X_2 \dots X_N)) = \min, \quad (10)$$

где  $L_1$  – величина пути сформированного объезда, км;  $T_1$  – время на проезд по сформированному маршруту объезда, мин.;  $L_2$  – величина пути сформированного объезда с учетом мест высадки, км;  $T_2$  – время на проезд по сформированному маршруту с учетом желаний пассажиров о месте высадки, мин.;  $X, X_2, \dots, X_N$  – факторы определяющие движение транспортного средства в реальном масштабе времени. Количество факторов  $N$  в общем случае для каждого критерия может быть различным:  $C, M, K, H$ .

Данная задача представляет собой задачу многокритериальной векторной оптимизации решение, которой представляет собой сложную задачу. Для решения задачи сведем её к стандартной транспортной задаче одного критерия с весовыми коэффициентами:

$$\begin{cases} u_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M L_{1ij} c_{ij} + u_2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M T_{1ij} c_{ij} + u_3 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M L_{2ij} c_{ij} + u_4 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M T_{2ij} c_{ij} \\ c_{ij} > 0 \end{cases} \quad (11)$$

где  $u_1, u_2, u_3, u_4$  – представляют собой весовые коэффициенты, которые определяют уровень значимости каждого критерия, а  $c_{ij}$  принимает значение 0 или 1, если новый маршрут не проходит через ребро  $ij$  и проходит соответственно.

Весовые коэффициенты определяются методом экспертных оценок или диспетчером, исходя из сложившейся ситуации. Задача формирования нового маршрута - поиска объездного кратчайшего пути от начальной до конечной точки блокируемого участка движения (с высадкой пассажиров в указанных местах) формализуется следующим образом: задана сеть (ориентированный взвешенный граф), состоящая из  $N$  узлов и нужно найти кратчайший путь из начальной точки в конечную, при условии, что кратчайший путь между этими точками проходит через заданные вершины. Здесь учитываем тот факт, что отождествляется точка выхода пассажира на участке трассы с вершиной  $K$  орграфа, а сам участок трассы с инцидентной ему дугой, выходящей из этой вершины.

Таким образом, задача сводится к поиску кратчайшего пути на орграфе между двумя заданными точками – начальной и конечной, при дополнительном ограничении, что этот кратчайший путь должен проходить через заданные вершины.

Рассмотрим ориентированный граф:  $G = (V, E, h)$ , в котором  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  – конечное множество вершин,  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  – конечное мно-

жество дуг,  $h$  – весовая функция дуг,  $c_{ij} = h(v_i, v_j)$  интерпретируется как длина участка. Дополнительно в графе фиксируются две вершины: начальная –  $v_s$ , и конечная –  $v_t$ . В предположении, что исходный граф связный, требуется определить маршрут минимальной длины из начальной вершины в конечную. Длина любого маршрута в графе равна сумме весов дуг, входящих в этот маршрут. Вводим булевы переменные  $x_{ij}$ , которые интерпретируются следующим образом. Переменная  $x_{ij} = 1$  если  $(v_i, v_j)$  входит в искомый маршрут минимальной длины, и  $x_{ij} = 0$  в противном случае, т.е. если дуга  $(v_i, v_j)$  не входит в оптимальный маршрут.

Тогда, целевая функция задачи принимает следующий вид:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min_{x \in \Delta_b} \tag{12}$$

Где множество допустимых альтернатив  $\Delta_b$  формируется следующей системой ограничений типа неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n x_{sj} - \sum_{i=1}^n x_{is} = 1 \tag{1} \\ \sum_{j=1}^n x_{tj} - \sum_{i=1}^n x_{it} = -1 \tag{2} \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} - \sum_{i=1}^n x_{ji} = 1 \quad (j = 1, 2 \dots n \quad j \neq s \quad j \neq t) \tag{3} \\ x_{ij} = 1, \tag{4} \\ x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in \{1, 2 \dots n\} \end{array} \right.$$

Ограничение (1) соответствует тому условию, что путь должен начинаться в вершине  $v_s$ . Ограничение (2) соответствует тому условию, что путь должен заканчиваться в вершине  $v_t$ . Ограничение (3) соответствует тому условию, что путь должен проходить через промежуточные вершины графа, что гарантирует связность минимального пути. Ограничение

(4) – дополнительное, и соответствует тому условию, что путь должен проходить еще и через заданные промежуточные вершины графа.

Последнее ограничение требует, чтобы переменные принимали только булевы значения. Те коэффициенты в целевой функции  $c_{ij}$  для которых весовая функция не определена или  $= 0$ , полагаем равными  $\infty$ , большому положительному числу.

Для решения поставленной задачи средствами MS EXCEL была разработана специальная программа [5]. Используя данный программный продукт, получаем кратчайший маршрут между заданными вершинами (перекрестками улиц), при условии, что он проходит через заданные ребра графа (улицы). Для моделирования процесса оперативного формирования маршрута по критерию – «Время» рассмотрим задачу нахождения оптимального пути от одной точки маршрута движения маршрутного такси (начало заблокированного участка) до другой (конец заблокированного участка). При этом карта города представляет собой граф, на котором улицы это ребра, а перекрестки – вершины графа.

Обозначим начальную точку буквой  $C_i$ , конечную –  $C_j$ . Нахождение оптимального пути представляет собой нахождение такого маршрута движения, на который будет затрачено минимальное время, необходимое для преодоления пути от точки  $C_i$  до точки  $C_j$  (см. рисунок 3). Вершины графа характеризуются временем их прохождения. Ребра представляют собой транспортные артерии, которые соединяют две вершины. Каждое ребро характеризуется рядом параметров, которые внесены в базу данных. К этим параметрам относят: длину улиц, рядность, наличие пробок и время их возникновения, качество покрытия дороги, наличие пешеходных переходов и светофоров, ограничение скорости и другие. Результатом решения является оптимальный маршрут, включающий время, прохождения каждого ребра нового пути, и времени, прохождения соответствующих вершин, т. е. их сумма. Определение времени движения производится из соотноше-

ния протяженности ребра к средней скорости движения. В зависимости от времени суток и других условий к этому времени вносятся поправки (из базы данных):

$$T_{ij} = t_{Nij} + \sum_{z=1}^n \Delta t_{Zij}, \quad (13)$$

где  $t_{Nij} = \frac{L_{Nij}}{v_{\max}}$  – время, необходимое на преодоление нового маршрута в отсутствии пробок, светофоров, характеристик магистрали и т.д., мин.;  $L_{Nij}$  – расстояние нового объездного маршрута, км;  $v_{\max}$  – максимально допустимая скорость движения на денном участке, км/ч;  $Z$  – задержка, связанная с фактором загруженностью магистрали (наличие пешеходных переходов, пробок, светофоров и т. д.);  $R$  – максимальное число задержек;  $\Delta t_{Zij}$  – численное значение величины задержки  $Z$  ребра  $ij$ .

При случайном увеличении пассажиропотока или аварийном сходе автобуса с маршрута при отсутствии резерва появляются новые, специфические задачи управления: а) расчет необходимого количества подвижных единиц на линии; б) определение резерва (анализ загрузки подвижных единиц на других маршрутах с целью их перевода на «аварийные»); в) составление расписаний и графиков движения автобусов на «аварийном» маршруте. Одним из вариантов решения данной ситуации может быть перераспределение транспортного ресурса между маршрутами. Очевидно, её решение состоит в сравнении экономических составляющих и обязательном выполнении объёма перевозок. Задачу перевозки пассажиров маршрутными такси работающих по вызову формально можно трактовать как классическую транспортную задачу.

Допустим, что требуется минимизировать целевую функцию

$$L = \sum_{i,j} c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (14)$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = \overline{1, n}, \quad (15)$$

где  $c_{ij}$  – стоимость перевозки пассажира от  $i$ -го пункта посадки (ПП) в  $j$ -й пункт высадки (ПВ), руб/пас.;  $x_{ij}$  – объем перевозки от  $i$ -го к  $j$ -му пункту, пас.;  $n$  – число ПП;  $a_i$  – число пассажиров на  $i$ -м ПП, пас.;  $m$  – число ПВ;  $b_j$  – объем выходящих на  $j$ -м ПВ, пас.

В качестве коэффициентов  $c_{ij}$  следует принимать значения тарифов на перевозку пассажиров для маршрутных такси по вызову (зонный или покилометровый). В случае, если перевозка пассажира между  $i$ -м ПП и  $j$ -м ПВ нежелательна,  $c_{ij}$  принимают равными некоторому большому числу  $M$ , запрещающему перевозку.

Транспортную задачу по перевозке пассажиров маршрутными такси можно представить в виде двух отдельных последовательно решаемых самостоятельных задач. Первая задача:

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = A_i, \quad i = \overline{1, n}; \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = B_j, \quad j = \overline{1, m}; \quad (18)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m} \quad (19)$$

где  $n$  – количество ПП;  $m$  – количество ПВ;  $S_{ij}$  – расстояние (себестоимость) от  $i$ -го ПП до  $j$ -го ПВ, км;  $x_{ij}$  – количество пассажиров, перевозимых из  $i$ -го ПП на  $j$ -й ПВ, пас.;  $A_i$  – количество пассажиров на  $i$ -м ПП, пас.;  $B_j$  – количество выходящих на  $j$ -м ПВ, пас.

Целевая функция (16) показывает стремление предприятия составить такие маршруты перевозки пассажиров, которые позволяют получить минимум пассажирооборота. Ограничение (1) показывает необходимость

посадки всех пассажиров на  $i$ -м ПП. Ограничение (2) свидетельствует о необходимости высадки на  $j$ -м ПВ. Ограничение (3) – это условия неотрицательности поиска решения задачи.

Вторую задачу - планирования расписания использования автотранспорта можно представить в виде следующей экономической модели:

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_{ij} x_{ij} \rightarrow \min ; \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq \sum_{i=1}^n V_i ; \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} = B ; \quad (22)$$

$$x_{ij} \geq 0 ; i = \overline{1, n} , j = \overline{1, m} ; \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq \sum_{i=1}^m K_i , \quad (24)$$

$$T_{ij} \leq T_a , \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_{ij} x_{ij} C \geq Z \quad (26)$$

где  $x_{ij}$  – количество перевозимых пассажиров из  $i$ -го ПП на ПВ  $j$ -м видов транспорта, пас.;  $S_{ij}$  – расстояние от  $i$ -го ПП до ПВ, км;  $C$  – тариф на перевозку руб./км;  $V_j$  – пассажировместимость одной машины  $j$ -го типа, пас.;  $B$  – общая потребность в перевозках, пас.;  $K_j$  – количество машин  $j$ -го типа (т.е. данной пассажировместимости);  $T_{ij}$  – время перевозки пассажира от  $i$ -го ПП до  $j$ -го ПВ на маршрутном такси по вызову, мин.;  $T_a$  – время перевозки пассажира от  $i$ -го ПП до  $j$ -го ПВ на автобусе, мин.;  $Z$  – затраты по перевозке, руб.

Целевая функция (20) показывает стремление предприятия снизить затраты автотранспорта при осуществлении процесса перевозки. Ограничение (21) показывает, что число пассажиров находящихся в транспорте не может превышать пассажировместимость. Уравнение (22) показывает

необходимость удовлетворения потребностей в перевозках. Ограничение (23) свидетельствует о целочисленности используемого транспорта при составлении расписания. Ограничение (24) устанавливает количество перевозимых пассажиров. Ограничение (25) показывает необходимость, чтобы время доставки пассажира от  $i$ -го ПП до  $j$ -го ПВ на маршрутном такси по вызову не было больше, чем на автобусе. Ограничение (26) устанавливает правило финансовой устойчивости предприятия, когда затраты по перевозке пассажиров не могут превышать доходы.

### Список литературы

1. Болдин К.В. Управленческие решения: Учебник / К.В. Болдин, С.Н. Воробьев, В.Б. Уткин. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2005. – 496 с.
2. Кнорринг В.И. Теория, практика и искусство управления / В.И. Кнорринг. – М.: Издательство Норма, 2001. – 528 с.
3. Постолиит А. Повышение эффективности пассажирских перевозок при использовании комплексного бортового оборудования / А. Постолиит, М. Габлин // Автомоб. транспорт, 2005, № 4. С. 38 ... 41.
4. Анциферова В.И. Математическое моделирование поиска документов / В.И. Анциферова // Системы управления и информационные технологии, N1.2(35). 2009. С. 212-215.
5. Черкасов, О.Н. Повышение эффективности управления автотранспортом на базе современных информационных технологий / О.Н. Черкасов, Г.Е. Ковалев, В.Е. Межов, В.К. Зольников // Информационные технологии моделирования и управления. 2005. № 2 (20). С. 178-184.