

УДК 004.942:656.078

## РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОЦЕНКЕ СТЕПЕНИ УЧАСТИЯ МУНИЦИПАЛИТЕТА В УПРАВЛЕНИИ СИСТЕМОЙ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА Г. КАМЫШИНА

Крушель Е.Г., Беришева Е.Д.

*Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Камышин, e-mail: elena-krushel@yandex.ru, elenaberisheva@mail.ru*

В статье предлагается способ обоснования изменений параметров транспортной системы городского общественного пассажирского автотранспорта (платы за проезд, количества транспортных средств и прибыли на каждом маршруте транспортной системы, а также ожидаемого пассажиропотока на всех дугах транспортной сети), которые могут произойти в результате внедрения мероприятий по повышению эффективности транспортной системы, планируемых муниципалитетом небольшого города. Эта задача затрагивает интересы пассажиров, владельцев частных транспортных средств, муниципальных властей, управления дорожным движением. Для решения поставленной задачи предлагаются способы скаляризации векторного критерия, позволяющие обеспечить компромисс между частично несовпадающими интересами различных социальных групп горожан. Скаляризация вектора проводится двумя способами: использование принципа чебышёвского выравнивания и поиск решения, доставляющего минимум средневзвешенному значению нормированных отклонений показателей от их оптимальных значений. Представлен пример нахождения компромиссного решения путем оптимизации показателя суммарной часовой прибыли от эксплуатации транспортных средств всех маршрутов, где для учета интересов отдельных групп горожан предусматриваются различные способы участия муниципалитета в управлении частными транспортными организациями. По результатам экспериментов сделаны выводы об эффективности существующей транспортной системы города и выработаны соответствующие рекомендации.

**Ключевые слова:** результаты моделирования системы общественного автотранспорта, оптимизация структуры пассажирского транспорта, критерии оптимизации

## RESULTS OF COMPUTATIONAL EXPERIMENT TO EVALUATE THE DEGREE OF PARTICIPATION OF MUNICIPALITIES IN THE ADMINISTRATION OF PUBLIC TRANSPORTATION OF KAMYSHIN CITY

Krushel E.G., Berisheva E.D.

*Kamyshin Technological Institute (branch of the) Volgograd State Technical University, Kamyshin, e-mail: elena-krushel@yandex.ru, elenaberisheva@mail.ru*

There is a way to study changes in the transport system parameters of urban public passenger transport (fares, the number of vehicles and the profit from each vehicle's route, and the expected passenger traffic of all arcs of the transport network) that may occur as a result of the introduction of measures to improve the efficiency of the transport system, that the small town municipality planned, represented in this article. This problem affects the interests of passengers, owners of private vehicles, municipal authorities, traffic control service. To solve this problem suggests ways scalarization vector criterion, allowing to provide a compromise between partially mismatched interests of different social groups of citizens. Scalarization of vector is conducted in two ways: using the principle of Chebyshev alignment and search for solutions, delivering a minimum weighted average of the normalized deviations of parameters from their optimal values. The example of finding a compromise solution by optimizing the index of total hourly income from the operation of the vehicle all of the routes, where to take into account the interests of certain groups of citizens of the municipality provides for various ways of participation in the management of private transport companies. According to the results of experiments made conclusions about the effectiveness of the existing city transport system and make appropriate recommendations.

**Keywords:** simulation results of the community passenger transport system, optimization of passengers transport structure, optimization criteria

В настоящее время большинство систем городского общественного пассажирского автотранспорта в небольших городах являются убыточными. Муниципальный пассажирский автотранспорт работает в условиях жесткой конкуренции с частным, который, в отличие от муниципального, является прибыльным. Целью исследования является поиск и обоснование вариантов управления городской транспортной системы (как муниципального, так и частного подчинения) со стороны администрации города, при которой

может быть преодолена убыточность муниципального автотранспорта.

Основные решения отработаны в процессе выполнения НИР по заказу администрации одного из небольших городов Волгоградской обл. Требовалось определить, какова должна быть степень участия муниципалитета в управлении не только муниципальным, но и частным пассажирским автотранспортом.

Подход к решению задачи базируется на идеях многокритериальной оптимизации

ции [1, 2], поскольку работа транспортной системы затрагивает не полностью совпадающие интересы различных социальных групп, в том числе: пассажиров (заинтересованных в снижении затрат времени на поездки и в низкой плате за проезд), администрации города (заинтересованной в увеличении налоговых поступлений в городской бюджет и в преодолении конфликтов, связанных с конкуренцией частных владельцев как между собой, так и с муниципальной транспортной системой), владельцев частных автотранспортных средств (заинтересованных в прибыли), управления дорожным движением (заинтересованного в отсутствии пробок и безаварийной работе транспортной системы).

Предлагается вариант векторного критерия, оптимизация которого может обеспечить компромисс между этими частично противоречивыми интересами за счет введения ряда общегородских ограничений.

Метод решения задачи – моделирование реакции как частного сектора, так и остальных социальных групп, заинтересованных в эффективной работе транспортной системы на различные варианты муниципальных ограничений, в том числе: введение единой платы за проезд на всех маршрутах частного автотранспорта; определение приемлемого значения этой цены; оценка количества транспортных средств на каждом маршруте; требование выравнивания прибыльности маршрутов.

Способ расчета: оценка перечисленных параметров по результатам оптимизации как векторного критерия, так и его элементов, осуществляемая на уровне муниципалитета. Данная оценка трактуется как ожидаемое значение технико-экономических показателей муниципального и частного автотранспорта при внедрении различных вариантов координации транспортной системы со стороны муниципалитета. Это дает возможность предсказать реакцию различных социальных групп, заинтересованных в работе транспортной системы, на внедрение предложений городской администрации. А также позволить в дальнейшем осуществить визуализацию движения транспорта в городе [3].

Обоснование допустимости муниципального вмешательства, в некоторой степени ограничивающего рыночную свободу частного бизнеса, основано на сопоставлении значения достигнутой прибыли частного сектора транспортной системы с ожидаемой после учета муниципальных требований. Расчеты, представленные ниже, показывают, что вмешательство муниципального управления приводит к упо-

рядочению работы частных транспортных средств, благодаря чему смягчаются различия в прибыльности отдельных маршрутов. В результате общая средняя прибыль частного сектора может оказаться больше, чем до введения муниципальных ограничений.

### Формальное описание и решение задачи

Решение задачи может оказаться различным в зависимости от того, какая из заинтересованных социальных групп будет оценивать качество системы транспортного обслуживания и предложит главный показатель, отвечающий ее интересам. Соответственно был разработан перечень следующих показателей качества как функции искомым переменных  $S$ :

1. Показатель  $Q_1(S)$ : суммарная часовая прибыль от эксплуатации транспортных средств (ТС) всех маршрутов (отвечает интересам муниципалитета и города в целом, поскольку обеспечивает высокий уровень налоговых поступлений в городской бюджет);  $Q_1(S) = \sum_{i \in w_a} \Pi_i(S)$ ,  $\Pi_i(S)$  – прибыль от эксплуатации  $i$ -го маршрута,  $i \in w_a$

2. Показатель  $Q_2(S)$ : удельная часовая прибыль всех частных транспортных организаций в расчете на 1 ТС/час (отвечает интересам владельцев частных транспортных средств);  $Q_2(S) = \frac{1}{\sum_{i \in w_a} n_i} \sum_{i \in w_a} n_i(S) \cdot \Pi_i(S)$ ,  $n_i(S)$  – количество транспортных средств, обслуживающих  $i$ -й маршрут,  $i \in w_a$ .

3. Показатель  $Q_3(S)$ : значение суммарного (по всем маршрутам) количества ТС/час (отвечает интересам управления дорожным движением);  $Q_3(S) = \sum_{i \in w_a} n_i(S)$ .

4. Показатель  $Q_4(S)$ : средневзвешенная (по числу ТС/час на маршрутах) плата за проезд (отвечает интересам пассажиров);

$Q_4(S) = \frac{1}{\sum_{i \in w_a} n_i(S)} \cdot \sum_{i \in w_a} n_i(S) \cdot c_i(S)$ ,  $c_i(S)$  – стоимость проезда, которую устанавливает владелец  $i$ -го маршрута,  $i \in w_a$ .

5. Показатель  $Q_5(S)$ : минимальное значение максимальной (по всем маршрутам) платы за проезд (вариант отвечает интересам владельцев маршрута, поскольку направлен на смягчение конкуренции между маршрутами);  $Q_5(S) = \max_{i \in w_a} \{c_i(S)\}$ .

Соответственно, задача определения значений  $S$  искомым переменных, отвечающих компромиссу между частично противоречивыми интересами различных социальных групп, формулируется как задача

оптимизации вектора показателей  $Q(S)$ :  $\{Q(S) = [Q_1(S), \dots, Q_5(S)]^T\}$ .

Подход, предложенный для решения задачи векторной оптимизации, содержит 2 этапа. На этапе 1 решается 5 однокритериальных задач, в каждой  $l$ -й из которых,  $l = 1, \dots, 5$ , рассчитываются оптимальные значения искомого переменных  $S^*$  и соответствующее им оптимальное значение  $Q_v^*(S^*)$  соответствующего показателя  $Q_v(S)$ , выбираемого в качестве критерия. Значения остальных показателей  $Q_m$ ,  $m = 1, \dots, 5$ ,  $m \neq v$  будут в общем случае иметь значения, не только отличающиеся от оптимальных, но и (возможно) окажутся неприемлемыми для других социальных групп. Критерии  $Q_1(S)$ ,  $Q_2(S)$  подлежат максимизации, остальные критерии – минимизации. Результаты решения представлены в статье [4].

На этапе 2 решается задача нахождения компромиссного решения с использованием двух подходов. Первый базируется на скаляризации вектора  $Q(S)$ , которая проводится одним из следующих способов:

– Нахождение решения, доставляющего минимум средневзвешенному значению нормированных отклонений показателей от их оптимальных значений:

$$\hat{Q}(S) = \sum_{v=1}^5 \alpha_v \cdot \frac{|Q_v(S^*) - Q_v^*(S^*)|}{\max(Q_v^*(S^*); Q_v(S^*))}. \quad (1)$$

Веса  $\alpha_v$  каждого из компонентов рассчитываются исходя из численности горожан, заинтересованных в соответствующем критерии;

– Использование принципа чебышёвского выравнивания, при котором минимизируется единая граница  $z$  нормированных отклонений показателей от оптимальных значений [5]:

$$\alpha_v \cdot \frac{|Q_v(S^*) - Q_v^*(S^*)|}{\max(Q_v^*(S^*); Q_v(S^*))} \leq z \quad \forall v = 1, \dots, 5. \quad (2)$$

Расчеты для компромиссных критериев (1), (2) должны быть выполнены как для различных, так и для равных значений весовых коэффициентов  $\alpha_v$ . Поскольку показатели  $Q_v$ ,  $v = 1, \dots, 5$ , не полностью противоречат друг другу, можно было ожидать, что решения не будут сильно зависеть от выбора весов  $\alpha_v$ , что и подтвердилось в расчетах.

Второй подход состоит в оптимизации показателя  $Q_1(S)$ , а для учета интересов отдельных групп горожан предусматриваются различные способы участия муниципалитета в управлении частными транспортными организациями [6].

В статьях [4, 7] представлена формализованная модель статической оптимизации структуры пассажирского транспорта не-

большого города. В данной работе описаны примеры использования разработанных математических моделей для повышения эффективности транспортной системы г. Камышина, имеющего 19 маршрутов и 78 остановок. Характеристика масштаба оптимизационных задач: число искомым переменных 200, число ограничений-равенств 100, число ограничений-неравенств 400.

### Результаты вычислительных экспериментов

Результаты решения частных оптимизационных задач с критериями во всех вариантах 1...5 на системе ограничений блока 1 представлены в отдельной статье. Приведенный анализ показал, что в рамках двухуровневой структуры управления частным общественным автотранспортом не удастся обеспечить компромисс между интересами различных социальных групп, заинтересованных в работе транспортной системы. Результаты оптимизации по вариантам скаляризации векторного критерия приведены в таблице.

В строках таблицы показаны значения показателей (компонентов векторного критерия, столбец 1) в процентах к потенциально достижимым значениям. Испытывались 2 варианта скаляризации: чебышёвское выравнивание с критерием (2), с различными и равными весами выравниваемых показателей (столбцы 2, 3 таблицы) и свертка отклонений показателей от оптимальных значений с различными и равными весовыми коэффициентами, критерий (1), (столбцы 4, 5). Для сравнения приведены расчеты показателей, достижимых при максимизации суммарной часовой прибыли при фиксированной плате за проезд на уровне действующей (столбец 6) и повышенной на 30% по сравнению с действующей платой (столбец 7).

Во всех вариантах скаляризации результаты получились близкими и приемлемыми, но во всех случаях выбор окончательного варианта остается за коллективом экспертов.

Компромисс между частично противоречивыми интересами социальных групп в вопросах управления транспортной системой может быть обеспечен не только скаляризацией векторного критерия, но и путем дополнений «обязательной» системы ограничений в задачах частной оптимизации каждого из критериев  $Q_1(S), \dots, Q_5(S)$  «необязательными» ограничениями из блока 2. Такие ограничения используются для имитации различных вариантов участия муниципалитета в управлении частной транспортной системой.

Варианты скаляризации векторного критерия

Критерии \ Показатели	Чebyшёвское выравнивание, разные веса компонентов критерия	Чebyшёвское выравнивание, равные веса компонентов критерия	Свёртка показателей, разные веса компонентов критерия	Свёртка показателей, равные веса компонентов критерия	Критерий: суммарная прибыль при существующей плате	Критерий: суммарная прибыль при плате, повышенной на 30%
	2	3	4	5	6	7
Суммарная прибыль	40%	31%	36%	34%	31%	40%
Удельная прибыль	29%	28%	34%	32%	29%	41%
Суммарное к-во ТС	297%	237%	228%	229%	233%	210%
Средневзвешенная плата	375%	331%	371%	360%	347%	452%
Максимальная (по всем маршрутам) плата	640%	353%	395%	359%	319%	415%

Были построены зависимости каждого из критериев от параметров, характеризующих интенсивность этих ограничений.



Рис. 1. Влияние фиксированной платы за проезд на суммарную прибыль

На рис. 1 показана зависимость суммарной прибыли от платы за проезд, устанавливаемой муниципалитетом одинаковой для всех маршрутов. Верхняя кривая соответствует отсутствию требования выравнивания прибылей отдельных маршрутов; нижняя рассчитана для случая, когда допустима погрешность выравнивания прибылей не превышает 5% величины средневзвешенной (по числу ТС на маршрутах) прибыли. Обе зависимости имеют экстремумы, которые соответствуют оптимальному балансу предложения услуг транспортных организаций пассажирам и спроса пассажиров на поездки, зависящего от установленной платы.

Для экспертов представляют интерес значения платы за проезд левее точки максимума. Если не устанавливать требование выравнивания прибылей, то при плате на уровне действующей прогнозируется 50%-ное

падение суммарной прибыли, крайне нежелательное для владельцев транспортных средств. При повышении действующей платы на 30% суммарная прибыль может уменьшиться на 30%, что, скорее всего, не приведет к активным протестам горожан и будет с пониманием встречено работниками транспортных организаций.

Ввод ограничения на допустимую погрешность выравнивания прибылей в области значений платы за проезд левее точки максимума может привести к потере 10% прибыли; на фоне объективно существующей неточности оценки пассажиропотока влиянием этого ограничения на суммарную прибыль можно пренебречь.



Рис. 2. Распределение прибыли между маршрутами

На рис. 2 представлено сравнение оценок прибылей отдельных маршрутов при фиксированной плате за проезд на уровне действующей. При отсутствии требований к выравниванию прибылей (светлые столбцы диаграммы) произойдет резкая дифференциация маршрутов по выгодности. Ввод огра-

ничения на допустимую погрешность выравнивания прибылей (не выше 5%) приведет к нивелированию различий маршрутов по выгодности (темные столбцы диаграммы). Но при фиксации платы за проезд на уровне действующей суммарная прибыль от эксплуатации частного транспорта снизится на 50%. Однако, поскольку объем налоговых поступлений в городской бюджет от эксплуатации частного общественного транспорта составляет незначительную часть общих налоговых поступлений, можно допустить такое снижение ради эффективного обслуживания пассажиров на всех маршрутах.

### Заключение

По результатам расчетов в муниципалитет города были переданы следующие рекомендации:

1. Двухуровневая структура управления частным общественным транспортом (верхний уровень – владелец или староста маршрута, нижний уровень – отдельное частное транспортное средство) является неэффективной, поскольку в рамках этой структуры не удастся обеспечить компромисс между интересами различных социальных групп, заинтересованных в работе транспортной системы. Целесообразно ввести третий, верхний уровень структуры, который будет внешним по отношению к частным транспортным организациям (уровень муниципального управления). Функции этого уровня – обеспечение баланса между частично противоречивыми интересами различных социальных групп, заинтересованных в работе транспортной системы.

2. На основе выполненных расчетов установлено следующее:

– Количество частных транспортных средств, эксплуатируемых в городе в настоящее время, может быть сокращено не менее чем в 2 раза без ущерба для качества обслуживания пассажиров. При этом прибыль отдельных маршрутов должна вырасти не менее чем на 20% при одновременном смягчении напряженности движения на загруженных магистралях и улучшении экологической обстановки вокруг них.

– Для условий небольшого компактного города целесообразно установить единую плату за проезд для всех маршрутов.

– Принятая в городе в настоящее время величина платы за проезд является заниженной. При планируемом изменении структуры управления общественным транспортом (путем объединения владельцев частных ТС в предприятия, обслуживающие конкретный маршрут) эта плата не обеспечивает самокупаемость ряда маршрутов. Рекомендуемое повышение платы за проезд – не более чем на 30% по сравнению с существующей.

3. Целесообразно предусмотреть выравнивание прибыли между маршрутами для предотвращения необоснованного роста платы за проезд и для сохранения сложившейся системы маршрутов общественного транспорта.

Муниципалитет на основании этих рекомендаций принял решение о создании муниципального предприятия, внедрение которого позволило отказаться от убыточного варианта транспортного обслуживания силами областной автоколонны.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 15-47-02321.*

### Список литературы

1. Примак М.Е. О сходимости модифицированного метода чебышевских центров решения задач выпуклого программирования // Кибернетика. – 1977. – № 5. – С. 100–102.
2. Салуквадзе М.Е. Об оптимизации векторных функционалов. I. Программирование оптимальных траекторий // Автомат. и телемех. – 1971. – выпуск 8. – С. 5–15.
3. Мотовилов А.С. Разработка flash-компонента отображения данных о картографических объектах / А.С. Мотовилов, А.Э. Панфилов // Современное состояние и перспективы развития технических наук: сборник статей Междунар. научно-практ. конференции (23 мая 2015, г. Уфа) / РИО МЦИИ «ОМЕГА САЙНС». – Уфа, 2015. – С. 91–93.
4. Крушель Е.Г. Результаты решения частных оптимизационных задач при определении степени участия муниципалитета в управлении системой общественного транспорта г. Камышина / Е.Г. Крушель, Е.Д. Беришева // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12–3. – С. 508–512.
5. Системы поддержки принятия решений: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / под ред. В.Г. Халина, Г.В. Черновой. – М.: Издательство Юрайт, 2015. – 494 с.
6. Набатова Д.С. Математические и инструментальные методы поддержки принятия решений: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / Д.С. Набатова. – М.: Издательство Юрайт, 2015. – 292 с.
7. Крушель Е.Г., Беришева Е.Д., Панфилов А.Э., Степанченко И.В. Статическая модель системы общественного автотранспорта малого города / Известия ВолгГТУ. – 2015. – № 13(177). – С. 100–104.