

УДК 330.46:656.13

д.э.н. *Бизянов Е. Е.,  
Козлова И. С.*  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, *kinnas@ukr.net*)

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ РАСПИСАНИЕМ ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

*В статье проведено исследование и выявлены проблемы городской транспортной сети. Предложено решение по улучшению работы городского транспорта путем оптимизации процессов управления расписанием движения автотранспорта на основе нечеткого генетического алгоритма.*

**Ключевые слова:** транспорт, пассажирооборот, пассажирские перевозки, оптимизация, управление расписанием, генетический алгоритм, нечеткое число, функция приспособленности, функция принадлежности.

**Постановка проблемы, обоснование ее актуальности.** Городской автотранспорт представляет собой одну из важнейших отраслей хозяйства, гарантируя жизнедеятельность населенных пунктов в части удовлетворения потребностей населения в бесперебойных и своевременных перевозках, а также обеспечивая муниципальные бюджеты дополнительным доходом. Так, по данным Министерства транспорта Российской Федерации, за период с января по сентябрь 2019 года автомобильным и автобусным транспортом общего назначения было перевезено 7665,0 млн человек при пассажирообороте 84,4 млрд пассажирокилометров, при этом пассажирские перевозки обеспечивали 442 предприятия [1].

К особенностям управления пассажирским транспортом в населенном пункте можно отнести большое количество остановок, а также различную протяженность маршрутов с постоянным изменением количества пассажиров в транспортных средствах и на маршрутах за сутки [2].

Как правило, необходимое количество транспортных средств на маршруте рассчитывается, исходя из их требуемой пассажироемкости, что обеспечивает минимизацию затрат перевозчика, при условии соблюдения нормативных требований по качеству обслуживания и безопасности пассажиров [2–4].

Одна из проблем автотранспортного предприятия — необходимость оптимизации деятельности с целью обеспечения перевозок всех пассажиров при одновременной минимизации затрат и максимизации прибыли перевозчика [2, 5]. Таким образом, оптимизация процессов управления расписанием движения для автотранспортных предприятий является актуальной задачей.

Задача оптимизации перевозок относится к комбинаторным, и может быть решена несколькими способами: простым перебором, с использованием деревьев и графов, а также с помощью генетических алгоритмов (ГА). Перебор и графы пригодны для случаев, когда количество комбинаций относительно невелико (несколько десятков). Однако при увеличении количества возможных комбинаций время поиска вышеуказанными способами может превысить предельно допустимое время, необходимое для составления расписания. ГА позволяют произвести оптимизацию при значительном количестве возможных альтернатив, учитывая при этом все необходимые ограничения, за минимально возможное время [6, 7].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Генетические алгоритмы в последние годы используют достаточно широко при решении задач составления расписаний, задач коммивояжера, оптими-

зации загрузки оборудования и т. п. [7]. Задача управления движением транспорта отличается от задачи коммивояжера тем, что обходу подлежат не все пункты (в нашем случае — остановки общественного транспорта), а только определенные.

В обзоре [3] показаны возможности использования методов искусственного интеллекта при управлении транспортом, отмечается положительный эффект при составлении расписания движения городского транспорта в г. Анкара (Турция), а также приведен пример использования ГА и нечетких методов при управлении сигналами светофоров на перекрестках.

В [4] сделана постановка задачи управления городским транспортом с учетом экономических, организационных, управленческих, технико-эксплуатационных, законодательных, нормативных показателей, а также показателей условий движения и качества обслуживания. Там же разработана хромосома для генетического алгоритма, предложены функции для скрещивания и мутации хромосомы, однако определение функции приспособленности дано в общем виде, как необходимость соблюдения неких ограничений.

В работе [5] рассмотрен гибридный генетический алгоритм оптимизации смешанных перевозок при перемещении грузов из некоторой начальной точки в конечную точку через  $N$  городов, лежащих на параллельных маршрутах. При этом основное внимание авторы [5] уделили разработке ограничений для функции приспособленности, а также операциям селекции, скрещивания и мутации.

Генетические алгоритмы, предложенные в [6], представляют в генах хромосомы количество рейсов определенных автобусов на маршрутах общественного транспорта, их расписание начала движения (часы и минуты), а также варианты временных интервалов прохождения участков маршрута.

Значительная часть других известных публикаций в основном повторяют идеи, предложенные в [2, 4–6], уделяя особое

внимание реализации операций мутации и скрещивания.

Особо отметим, что при реализации пассажирских перевозок существует проблема неопределенности пассажиропотоков, которую можно учесть, задав количество пассажиров на маршруте в виде диапазона значений, средним значением или же нечетким числом [7].

В [8, 9] рассмотрены нечеткие ГА, в которых предложено сделать нечеткими механизмы мутации и скрещивания. Обычно в генетических алгоритмах функция приспособленности возвращает вещественный результат [8], поэтому в [9] предложено использовать усредненное значение функции принадлежности.

Мы предлагаем производить оптимизацию, используя нечеткие значения загрузки маршрутов. При этом в функцию пригодности будем подставлять значения загрузки, полученные из функции принадлежности для нескольких значений уровня возможности [7]: 0, 0,5 и 1. Таким образом, оптимизацию будем производить для пяти значений загрузки остановок на маршрутах.

**Целью статьи** является разработка модели оптимизации расписания движения транспортных средств в городе на основе нечеткого генетического алгоритма.

**Изложение материала и его результаты.** Рассмотрим в качестве примера простую транспортную сеть, показанную на рисунке 1.

В населенном пункте имеется три маршрута, причем количество остановок на них различное. Первый и второй маршруты, а также второй и третий имеют общие остановки, а также общие участки.

Транспортные средства могут перемещаться с одного маршрута на другой. Если транспортное средство переместилось на другой маршрут, оно продолжает движение до конечной остановки нового маршрута.

Сформулируем задачу составления оптимального расписания следующим образом. В городе имеется  $N$  маршрутов движения, на каждом из которых расположе-

ны  $s_i, i=\overline{1, N}$  остановок. Каждый  $i$ -й маршрут разделен на  $k_j^i, j=\overline{1, s_i-1}$  участков. По маршрутам осуществляют перевозку  $m_i$  транспортных средств, причем

$\sum_{i=1}^N m_i = M$ , где  $M$  — общее количество транспортных средств на всех маршрутах.

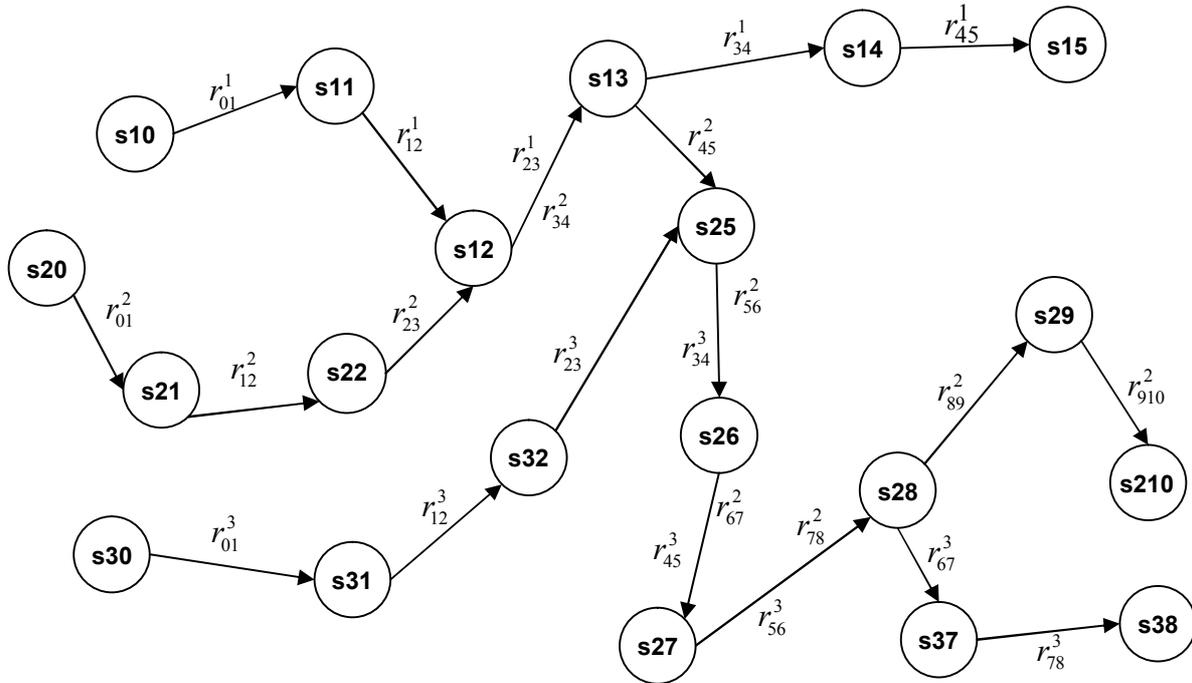


Рисунок 1 Гипотетическая транспортная сеть населенного пункта

Введем следующие ограничения и допущения:

1. Общая прибыль, полученная от перевозок максимальна:

$$P_T = \sum_{i=1}^N E_i - C_T \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $P_T$  — прибыль от всех перевозок;

$E_i$  — выручка от перевозок на  $i$ -м маршруте, рассчитываемая по формуле:

$$E_i = \sum_{j=1}^{s_i} n_{P_j}^{i, out} \cdot C_{tr}, \quad (2)$$

где  $s_i$  — количество остановок на  $i$ -м маршруте;

$n_{P_j}^{i, out}$  — количество пассажиров, вышедших (оплативших проезд) на  $j$ -й остановке  $i$ -го маршрута;

$C_{tr}$  — стоимость проезда;

$C_T$  — затраты на все перевозки:

$$C_T = \sum_{i=1}^N C_i \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $C_i$  — затраты на перевозки на  $i$ -м маршруте, рассчитываемые по формуле:

$$C_i = m_i \cdot \sum_{j=1}^{k_i} L_j^i \cdot C_S^1, \quad (4)$$

где  $m_i$  — количество транспортных средств на  $i$ -м маршруте;

$L_j^i$  — длина  $j$ -го участка пути на  $i$ -м маршруте;

$C_S^1$  — расходы на 1 км пути, включающие стоимость топлива, заработную плату персонала, амортизацию и пр.

2. Все транспортные средства одинакового типа и имеют вместимость  $CP^1$  пассажиров и перемещаются с одинаковой средней скоростью  $V_M^1$ .

3. Описание всех имеющихся маршрутов сведем в следующие матрицы:

– матрица перекрытий маршрутов размерностью  $K_O \times N$ , где  $K_O$  — количество общих участков на всех маршрутах, элементы которой представляют номера общих участков соответствующих маршрутов;

– матрица общих остановок размерностью  $N_{TS} \times N$ , где  $N_{TS}$  — максимальное количество общих остановок на одном из маршрутов, элементы представляют номера общих остановок соответствующих маршрутов;

– матрица расстояний между остановками на маршрутах размерностью  $k_j^{\max} \times N$ , где  $k_j^{\max}$  — максимальное количество участков на одном из маршрутов, элементы которой являются протяженностью (длиной) участков маршрутов.

Загрузку остановок на маршрутах по времени представим в виде трехмерной матрицы размерностью  $N_{TS} \times N \times TI$ , строки которой представляют остановки, столбцы — маршруты, а слои — временные отметки (часы, полчаса), где  $TI$  — количество временных отметок.

В ячейки матрицы заносят ожидаемое количество пассажиров в виде нечетких чисел с треугольной функцией принадлежности [6]:

$$SD_{ij} = \tilde{np}_{ij}, i = \overline{1, R}, j = \overline{1, N}, t = \overline{t_b, t_e}, \quad (5)$$

где  $\tilde{np}_{ij}$  — количество пассажиров на  $i$ -й остановке  $j$ -го маршрута в момент времени  $t$ ;

$t_b, t_e$  — начальное и конечное время работы транспорта соответственно.

Треугольная функция принадлежности для нечеткого числа, которым мы будем представлять количество пассажиров на

остановках, имеет вид, показанный на рисунке 2.

Здесь  $x^*$  — значение аргумента, соответствующего наивысшему уровню возможности  $\mu(x)=1$ , называемое также модой нечеткого числа;  $x_L, x_R$  — левая и правая границы носителя нечеткого числа.

$\alpha$ -уровень на рисунке 2 отображает заданный уровень возможности появления определенного количества пассажиров на остановке, причем  $\alpha \in R, \alpha = \overline{0, 1}$ .

Количество пассажиров на  $i$ -й остановке  $j$ -го маршрута в момент времени  $t$  будем определять по формуле:

$$\tilde{np}_{ijt} = \tilde{np}_{ijt-1} + \tilde{np}_{ijtIN} - \tilde{np}_{ijtOUT}, \quad (6)$$

где  $\tilde{np}_{ijt}$  — количество пассажиров на  $i$ -й остановке  $j$ -го маршрута в момент времени  $t-1$ ;

$\tilde{np}_{ijtIN}, \tilde{np}_{ijtOUT}$  — количество входящих и выходящих пассажиров на  $i$ -й остановке  $j$ -го маршрута в момент времени  $t$  соответственно.

Если маршруты имеют общие остановки, поток пассажиров будем делить поровну.

Оптимальным будем считать расписание, в котором транспортные средства распределены между маршрутами таким образом, чтобы выполнялись условия (2) и (3), что можно выразить через обеспечение максимальной прибыли от перевозок (1).

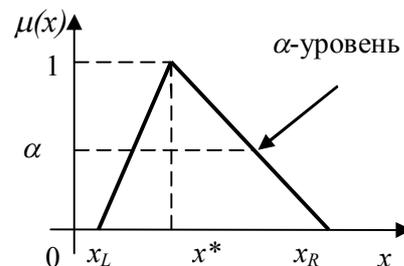


Рисунок 2 Треугольная функция принадлежности нечеткого числа

Одной из основных проблем при построении генетического алгоритма является построение хромосомы и функции приспособленности [7].

Хромосому определим следующим образом:

$$Ch = \left( \begin{array}{l} [m_1 \ m_2 \ \dots m_N \ t_1 \ t_2 \ \dots t_N]^{t_1} \dots \rightarrow \\ [m_1 \ m_2 \ \dots m_N \ t_1 \ t_2 \ \dots t_N]^{t_2} \dots \rightarrow \\ [m_1 \ m_2 \ \dots m_N \ t_1 \ t_2 \ \dots t_N]^{t_z} \end{array} \right), \quad (7)$$

где гены  $[m_i \ t_i]^{t_u}$  отражают количество транспортных средств  $i$ -го маршрута и интервал их движения на  $t_u$ -м отрезке времени, закодированные в двоичной форме.

Количество разрядов для кодирования генов определяется максимальным количеством транспортных средств, находящихся на заданном участке маршрута и максимальным значением интервала движения в минутах: для 1–4 транспортных средств достаточно 2 разряда, для 1–8 транспортных средств — 3 разряда, и т. д. согласно степени числа 2.

Точками разрыва в хромосоме примем границы между маршрутами.

Для поставленной выше задачи функция приспособленности должна возвращать рассчитанное значение прибыли для текущего состояния хромосомы. Расчет производится в следующей последовательности:

1. Определяем количество рейсов для всех транспортных средств на каждом маршруте за заданный отрезок времени (например, полчаса).

2. Рассчитываем выручку по формуле (2).

3. Рассчитываем затраты на перевозку по формулам (3) и (4).

4. Рассчитываем прибыль по формуле (1).

Как было принято ранее, оптимизацию производим для пяти значений загрузки остановок на маршрутах, полученных из функций принадлежности для  $\alpha$  уровней:  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha_2 = 0,5$ ,  $\alpha_3 = 1$ .

Операции мутации и скрещивания рассмотрены в соответствующей литературе,

и, можно сказать, достаточно полно формализованы. Кроме того, имеется ряд библиотек, написанных на языках программирования C++ и Java, которые в полной мере реализуют все необходимые операции для ГА. Используем для нахождения решения свободно распространяемую библиотеку Jenetics (<http://jenetics.io>), созданную для реализации ГА в среде языка Java. Для реализации ГА определим хромосому согласно (7), функцию пригодности согласно (1)–(4), а для эволюции воспользуемся стандартными классами из библиотеки Jenetics, позволяющими реализовывать мутацию с генами переменной длины.

На рисунке 3 показан процесс генерации поколений для нечеткого генетического алгоритма для различных значений уровня возможности.

Полученные нечеткие значения количества транспортных средств на маршрутах и временных интервалов их движения необходимо привести к четким значениям, используя метод центра тяжести [7] по формуле

$$x^* = \frac{\sum x_i \cdot \mu(x_i)}{\sum \mu(x_i)}, \quad (8)$$

где  $x^*$  — дефазифицированное значение  $x$ ;

$x_i$  —  $i$ -е значение аргумента функции принадлежности;

$\mu(x_i)$  — значение функции принадлежности для  $x_i$ .

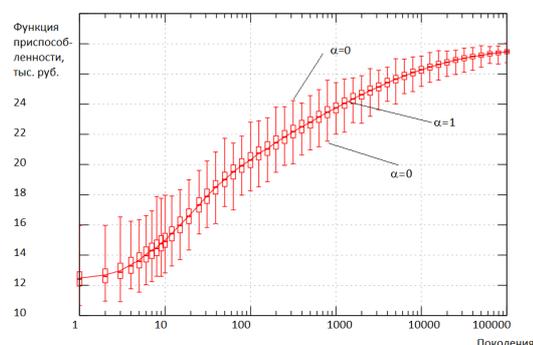


Рисунок 3 Значения функции пригодности для нечеткого ГА

Для рассмотренного нами случая  $i = \overline{1,5}$ .

В результате выполнения нечеткого ГА мы получим трехмерную матрицу — расписание  $N \times TI \times M$ , строки которой содержат количество транспортных средств на маршрутах, столбцы — временные отметки (часы, полчаса), а слои — маршруты.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** В статье рассмотрена модель оптимизации расписания движения транспортных средств на маршрутах в населенном пункте. В ходе исследований предложено составлять расписание движения автотранспортных предприятий с использованием нечеткого генетического алгоритма.

Для приближения модели к реальным условиям предложено отказаться от усреднения числа пассажиров на остановках общественного транспорта по времени суток, а перейти к их возможному количеству, представленному нечетким числом.

Внедрение мероприятий координации интервалов движения транспортных средств на городских маршрутах при наличии на них совместных участков позволит улучшить качество обслуживания пассажиров за счет согласования расписания движения, а также обеспечит максимально возможный приток прибыли автотранспортных предприятий.

### Библиографический список

1. Сайт Министерства транспорта Российской Федерации [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <https://www.mintrans.ru/ministry/results/180/documents>.
2. Давідіч, Ю. О. Розробка розкладу руху транспортних засобів при організації пасажирських перевезень [Текст] : навч. посібник / Ю. О. Давідіч. — Х. : ХНАМГ, 2010. — 345 с.
3. Abduljabbar Rusul. Applications of Artificial Intelligence in Transport [Text] : An Overview / Rusul Abduljabbar, Hussein Dia, Sohani Liyanage, Saeed Asadi Bagloee // Sustainability. — 2019. — № 11. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/330110260>.
4. Напхоненко, Н. В. Многофакторная оптимизация системы городских пассажирских перевозок с использованием генетического алгоритма [Текст] / Н. В. Напхоненко, М. Р. Караева // Вестник ЮРГТУ — 2011. — № 4. — С. 64–68.
5. Jing, X. A hybrid genetic algorithm for route optimization in multimodal transport [Text] / X. Jing, Y. Liu, W. Cao // Fifth International Symposium on Computational Intelligence and Design. IEEE.— Hangzhou, 2012. — Vol. 1.— P. 261–264.
6. Караева, М. Р. Логистическая модель совершенствования управления городскими пассажирскими перевозками [Текст] : автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / М. Р. Караева. — Ростов н/Д : Рост. гос. строит. ун-т, 2014. — 23 с.
7. Нечеткие модели и нейронные сети в анализе и управлении экономическими объектами [Текст] / Ю. Г. Лысенко, Е. Е. Бизянов, А. Г. Хмелев и др. — Донецк : Юго-Восток, 2012. — 388 с.
8. Mohammad, J. V. A Genetic Algorithm with Fuzzy Crossover Operator and Probability [Text] / Mohammad Jalali Varnamkhasti, Lai Soon Lee, Mohd Rizam Abu Bakar, Wah June Leong // Hindawi Publishing Corporation Advances in Operations Research. — Vol. 2012. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/aor/2012/956498>.
9. Plerou, A. Fuzzy Genetic Algorithms: Fuzzy Logic Controllers and Genetics Algorithms / Antonia Plerou, Elena Vlamou, Vasil Papadopoulos // Global Journal for Research Analysis. — November, 2016. — Vol. 5. — Issue 11. — P. 497–500.

© Бизянов Е. Е.

© Козлова И. С.

**Рекомендована к печати нач. управления экономики, рыночных отношений и собственности Администрации г. Алчевска ЛНР Гребеньковой С. П., д.э.н., проф., зав. каф. ЭУ ДонГТУ Коваленко Н. В.**

*Статья поступила в редакцию 24.03.20.*

**Doctor of Economics Bizianov E. E., Kozlova I. S.** (*DonSTU, Alchevsk, LPR, kinnas@ukr.net*)

**OPTIMIZATION OF TRAFFIC SCHEDULE MANAGEMENT PROCESSES USING A FUZZY GENETIC ALGORITHM**

*The article studies and identifies the problems of the urban transport network. A solution is proposed to improve the operation of urban transport by optimizing the traffic schedule management processes on the basis of a fuzzy genetic algorithm.*

**Key words:** *transport, passenger turnover, passenger transportation, optimization, schedule management, genetic algorithm, fuzzy number, fitness function, membership function.*