

## ОПТИМИЗАЦИЯ ГОРОДСКИХ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК В ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЭЛЕКТРОКАРОВ

Шуть В.Н., Швецова Е.В.

*Брестский государственный технический университет, Беларусь, Брест, lucking@mail.ru*

### Введение

В работе дается описание принципов функционирования интеллектуальной информационно-транспортной системы, способной совмещать в себе черты частного и общественного транспорта и снизить нагрузку на систему общественного городского транспорта.

Объектом исследования является процесс составления плана перевозок с использованием беспилотного транспорта, управляемого интеллектуальной системой при минимальном участии человека. Целью работы является разработка математической модели построения плана перевозок пассажиров с помощью такой информационно-транспортной системы. Результатом составления плана перевозок является множество остановок доставки для каждого транспортного средства, участвующего в реализации данного плана перевозки. Приведена оценка необходимого количества транспортных средств, подтвержденная результатами апробации, приведенными в работе.

### Информационно-транспортная система и ее алгоритм функционирования

Информационно-транспортная система и ее принципы работы были подробно описаны в публикациях [1-9]. В данной работе представлено дальнейшее развитие алгоритма составления плана развозки по матрице корреспонденций.

Исходные данные для рассмотрения алгоритма состоят из:

- парка беспилотных электрокаров, называемых инфобусами, способных объединяться в автопоезда, соединения в которых виртуальные [10] и управляемых из единого информационного центра;
- заявок от пассажиров, на основании которых координирующий сервер формирует специальную матрицу корреспонденций  $M_z$ ,  $Z=1,2,\dots$ , в которой фиксируется каждый прибывающий на остановку пассажир и каждый элемент  $m_{ij}$  определяет число пассажиров, следующих с остановки  $i$  на остановку  $j$ ,  $i, j = \overline{1, k}$ , где  $k$  - число остановок одного направления маршрута [11-15]:

$$M_z = \begin{pmatrix} 0 & m_{12} & m_{13} & \dots & \dots & m_{1j} & \dots & m_{1k} \\ 0 & 0 & m_{23} & \dots & \dots & m_{2j} & \dots & m_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & m_{i+1} & \dots & m_{ij} & \dots & m_{ik} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & m_{k-1k} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

В момент накопления определенного числа пассажиров в матрице корреспонденций  $M_z$ ,  $Z=1,2,\dots$  формируется план развозок, который представляет совокупность множеств остановок доставки  $\bigcup_{i=1}^{k-1} J_{n_i}, n_i \in N, i = \overline{1, k-1}$  для инфобусов [1-9], где индекс  $n_i \in N$  указывает на порядковый номер инфобуса и начальную остановку развозки, а содержание множества  $J_{n_i}$  указывает на номера остановок, на которых данный инфобус будет осуществлять высадку пассажиров.

На некоторых остановках данного множества в инфобус могут сесть пассажиры, едущие на последующие остановки множества  $J_{n_i}$ . Для определения таких остановок находится объем заполнения (*occupied places*) салона инфобуса при отправлении с начальной  $i$ -ой оста-

новки:  $V_{op}^i = \sum_{j \in J_{n_i}} m_{ij}$ . По приезде на любую остановку  $j \in J_{n_i}$  реального множества остановок из салона выходят пассажиры и объем заполненных мест, сформировавшийся при отправлении с предыдущей остановки, увеличивается на количество вышедших пассажиров, которое находится как сумма всех элементов  $m_{i^*j}$  столбца  $j$  матрицы корреспонденций  $M_Z$ , у которых индекс  $i^*$  по своим значениям удовлетворяет требованию  $i^* \leq j, i^* \in J_{n_i}$ , и становится равным  $V_{op}^{j-1} - \sum_{i^* \leq j} m_{i^*j}$ ,  $j, i^* \in J_{n_i}$  (для остановки с наименьшим номером из множества  $J_{n_i}$  формула примет вид  $V_{op}^i - \sum_{i^* \leq j} m_{ij}$ ,  $j, i^* \in J_{n_i}$ ). При наличии достаточного количества мест в салоне с остановки  $j \in J_{n_i}$  могут быть взяты пассажиры, едущие на последующие остановки множества  $J_{n_i}$  при выполнении условия:

$$V_{op}^{j-1} - \sum_{i^* \leq j} m_{i^*j} + \sum_{j^* > j} m_{jj^*} \leq V, i^*, j, j^* \in J_{n_i}, \quad (1)$$

т.е. на остановке  $j$  в салон может войти количество пассажиров, которое находится, как сумма элементов строки  $j$  матрицы  $M_Z$ , удовлетворяющая условию (1). Элементы  $m_{jj^*}$  матрицы  $M_Z$ , удовлетворяющие условию (1) объединяются в множество остановок посадки (*boardig*) пассажиров  $J_{n_iB}$ , которые садятся в инфобус на остановках множества  $J_{n_i}$ . Элементы матрицы  $M_Z$ , принадлежащие совокупности  $\{m_{ij} \mid j \in J_{n_i}\} \cup J_{n_iB}$  и соответствующие остановкам, на которые предполагается развозка пассажиров инфобусом с номером  $n_i$  обнуляются, приводя матрицу корреспонденций в новое состояние, которое используется для составления плана развозки для следующего инфобуса. Итерации выполняются до тех пор, пока все элементы матрицы  $M_Z$  не обнулятся.

Для иллюстрации алгоритма на конкретном примере информация о пассажирах, едущих в инфобусе  $n_i$ , начавшем развозку от остановки  $i$ , будет определяться массивом (*Passengers*)  $P_{n_i}$ , значение  $k$ -го элемента которого определяет количество пассажиров, едущих на остановку  $k$ . Также будут использоваться следующие входные параметры и матрица корреспонденций:

$$V = 15, a = 0.5, n = 7$$

$$M_z = \begin{pmatrix} 0 & 7 & 2 & 7 & 6 & 4 & 3 \\ 0 & 0 & 6 & 1 & 6 & 7 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 7 & 7 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 7 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Тогда для инфобуса 1, начавшего развозку с остановки 1 множество доступных остановок  $J_{1P} = \{2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ , множество остановок доставки  $J_1 = \{5, 6, 7\}$ , массив  $P_1 = \{0, 0, 0, 0, 6, 4, 3\}$ . На остановке 5 объем свободных мест равен  $V_{fp} = V - \sum P_1 + p_5 = 15 - (6 + 4 + 3) + 6 = 8$ . Следовательно, инфобус может взять с остановки 5 на остановку 6 пять человек, т.к.  $m_{56} = 5 < V_{fp} = 8$ . Следовательно,

$P_1 = \{0, 0, 0, 0, 6 - 6, 4 + 5, 3\} = \{0, 0, 0, 0, 0, 9, 3\}$ . Для остановки 6 объем свободных мест находится:  $V_{fp} = V - \sum P_i + p_6 = 15 - (9 + 3) + 9 = 12$ . Т.к.  $m_{67} = 3 < V_{fp} = 12$ , то  $J_{1,B} = \{5, 6\} \Rightarrow P_1 = \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 6\}$ . Таким образом, на конечную остановку инфобус 1 привезет 6 человек. Матрица корреспонденций примет вид:

$$M_z = \begin{pmatrix} 0 & 7 & 2 & 7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6 & 1 & 6 & 7 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 7 & 7 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 7 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

С остановки 1 стартует также инфобус 2, для которого  $J_{2,P} = \{2, 3, 4\}, J_{2_1} = \{3, 4\}, P_{2_1} = \{0, 0, 2, 7, 0, 0, 0\}$ . На остановке 3 он возьмет пассажиров на остановку 4, т.к.  $m_{34} = 6 < V_{fp} = V - \sum P_{2_1} + p_3 = 15 - (2 + 7) + 2 = 8 \Rightarrow P_{2_1} = \{0, 0, 0, 13, 0, 0, 0\}$ .  $J_{2_1,B} = \{3\}$ . На остановке 4 из инфобуса выйдут все 13 пассажиров, и он останется пустым. Таким образом, инфобус 2 можно считать, как приехавший для развозки, в которой остановка 4 будет начальной. Тогда для него можно сформировать новое множество доступных остановок и множество остановок доставки:  $J_{2_4} = \{5, 6, 7\}$ , и т.к.  $m_{47} + m_{46} + m_{45} = 10 < V_{fp} = 15 \Rightarrow J_{2_4} = \{5, 6, 7\} \Rightarrow P_{2_4} = \{0, 0, 0, 0, 2, 7, 1\}$ . На остановке 5 инфобусом 2 будут забраны пассажир, т.е.  $J_{2_4,B} = \{5\}$ , т.к.  $m_{57} = 5 < V_{fp} = V - \sum P_{2_4} + p_5 = 7 \Rightarrow P_{2_4} = \{0, 0, 0, 0, 0, 7, 6\}$ . На остановке 6 выйдет 7 пассажиров, и никто не сядет, т.к. все пассажиры были забраны предыдущим инфобусом, инфобусом 1. На конечной остановке из инфобуса 2 выйдет 6 пассажиров. Матрица корреспонденций примет вид:

$$M_z = \begin{pmatrix} 0 & 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6 & 1 & 6 & 7 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 7 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Для развозки оставшихся пассажиров системой будет использовано еще 3 инфобуса. Для инфобуса 3:  $J_{3_1,P} = \{2\}, J_{3_1} = \{2\}, P_{3_1} = \{0, 7, 0, 0, 0, 0, 0\}$ . Далее инфобус 3 начинает вывоз с остановки 2 на остановки 5, 6, 7 без забора на данных остановках пассажиров, т.к. с этих остановок вывоз пассажиров был уже произведен:  $J_{3_2,P} = \{3, 4, 5, 6, 7\}, J_{3_2} = \{5, 6, 7\}, P_{3_2} = \{0, 0, 0, 0, 6, 7, 1\}$ . Матрица корреспонденций примет вид:

$$M_z = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 7 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Для инфобуса 4:  $J_{4_2 P} = J_{4_2} = \{3, 4\}, P_{4_2} = \{0, 0, 6, 1, 0, 0, 0\}$ . По приезде на остановку 3 из инфобуса выйдут 6 пассажиров и никто не войдет, т.к. никто из пассажиров остановки 3 не едет на остановку 4. На остановке 4 инфобус высадит одного человека и поедет на конечный пункт. Матрица  $M_z$  примет вид:

$$M_z = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 7 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Для инфобуса 5:  $J_{5_3 P} = J_{5_3} = \{5, 6, 7\}, P_{5_3} = \{0, 0, 0, 0, 7, 7, 1\}$ . Он забирает всех пассажиров с остановки 3 и развозит в пункты требования. На этом обработка матрицы корреспонденций  $M_z$  согласно алгоритму будет завершена. План развозки имеет вид совокупности  $J_{1_1} \cup J_{2_1} \cup J_{2_4} \cup J_{3_1} \cup J_{3_2} \cup J_{4_2} \cup J_{5_3}$ .

### Оценка необходимого количества инфобусов

Нижнюю границу необходимого числа транспортных средств можно оценить, как ближайшее целое число, большее частного [10]:

$$N_{\text{инт}} = \left( \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k m_{ij} \right) : V.$$

Верхнюю границу необходимого числа инфобусов можно оценить, как случай, когда каждый инфобус везет пассажиров только на одну станцию назначения и каждый пассажир достигает своего пункта назначения без остановок (рис. 1).

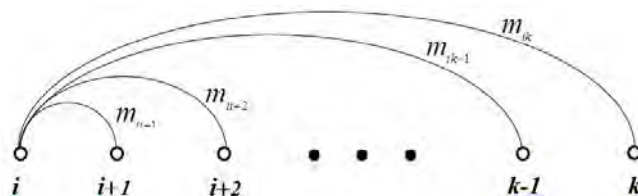


Рисунок 1 - Каждый инфобус везет пассажиров только на одну остановку

Для выполнения полной развозки всех пассажиров от остановки 1 необходим  $(k-1)$ -инфобус. Для развозки пассажиров от остановки 2 требуется на два инфобуса меньше, т.к. число остановок сократилось на одну и инфобус, привезший пассажиров с остановки 1 будет использован повторно. Т.е. необходи-

мое число инфобусов, вновь вводимых в систему для вывоза пассажиров с остановки 2, будет  $(k-3)$  и т.д. Таким образом, получается убывающая арифметическая прогрессия с разностью  $d = -2$  и  $n$ -ым членом:

$$a_i = (k - 1) - 2(i - 1) = (k + 1) - 2i \geq 1 \Rightarrow 0 < i \leq \frac{k}{2}.$$

где  $i$ - номер строки матрицы корреспонденций или номер остановки отправления.

Значит, при нечетном количестве остановок для выполнения плана развозки согласно описанному алгоритму максимально потребуется инфобусов:  $N_{BG} = S_{\frac{k-1}{2}} = (k^2 - 1) : 4$ . А при четном количестве остановок:  $N_{BG} = S_{\frac{k}{2}} = k^2 : 4$ .

Правильность расчета верхней границы числа использованных инфобусов подтверждается на практике. На рис.2 и рис.3 представлены диаграммы зависимости использованных инфобусов от количества остановок на маршруте, полученные на основании выходных данных программы, имитирующей описанный алгоритм.

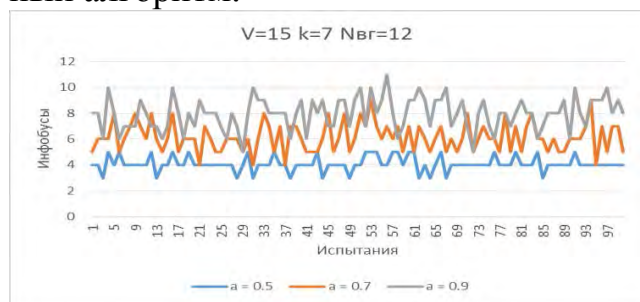


Рисунок 2- Количество использованных инфобусов на маршруте с семью остановками

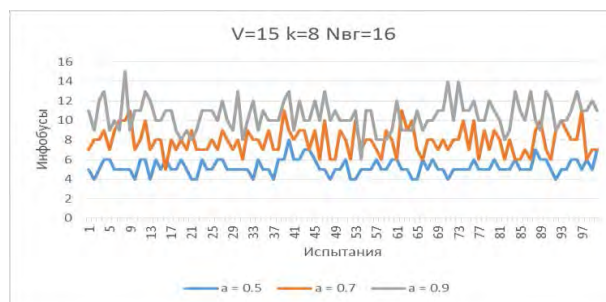


Рисунок 3- Количество использованных инфобусов на маршруте с восемью остановками

## Заключение

В статье разработаны принципы функционирования информационно-транспортной системы, базирующейся на использовании, управляемых из единого центра, парка беспилотных транспортных средств. Приведен алгоритм составления плана развозки пассажиров с помощью данной транспортной системы. Работа имеет актуальность, т.к. предложенная транспортная система способна функционировать без участия или с минимальным участием человека, адаптируясь к динамике изменений транспортного потока.

## Библиографический список

1. Жогал, А.Н. Автоматический городской интеллектуальный пассажирский транспорт / А.Н. Жогал, В.Н. Шуть, Е.В. Швецова // Транспорт и инновации: вызовы будущего: материалы Международной научной конференции. - Минск: Национальная библиотека Беларуси, 2019. – С. 82
2. Швецова, Е.В. Алгоритм составления плана перевозок на городских линиях в интеллектуальной системе управления беспилотными транспортными средствами / Е.В. Швецова, В.Н. Шуть // Вестник Херсонского национального технического университета. – Т. 2(69), № 3. – Херсон: ХНТУ, 2019. – С. 222-230
3. Швецова, Е.В. Алгоритм составления плана перевозок на городских линиях в интеллектуальной системе управления беспилотными транспортными средствами / Е.В. Швецова, В.Н. Шуть // Материалы XX международной конференции по математическому моделированию: сборник материалов конференции. – Херсон: ХНТУ, 2019. – С. 115

4. Shuts, V. System of urban unmanned passenger vehicle transport / V. Shuts, A. Shviatsova // ICCPT 2019: Current Problems of Transport: Proceedings of the 1st International Scientific Conference. – Ternopol: TNTU, 2019 – С. 172-184
5. Шуть, В.Н. Алгоритм организации городских пассажирских перевозок посредством рельсового беспилотного транспорта "Инфобус" / В.Н. Шуть, Е.В. Швецова // ACTUAL PROBLEMS OF FUNDAMENTAL SCIENCE: third international conference. – Луцк: Вежа-Друк, 2019– С. 222-226
6. Shuts, V. Cassette robotized urban transport system of mass conveying passenger based on the unmanned electric cars / V. Shuts, A. Shviatsova// Science. Innovation. Production. Proceedings of the 6th Belarus-Korea Science and Technology Forum. – MINSK: BNTU, 2019. – С. 81-83
7. Shuts, V. Intelligent system of urban unmanned passenger vehicle transport / V. Shuts, A. Shviatsova // Abstracts of the 16th European Automotive Congress (EAEC 2019) hosted jointly the Academic Automotive Association (Belarus), the European Automobile Engineers Cooperation (EAEC) and the Federation Internationale des Societes d'Ingenieurs des Techniques de l'Automobile (FISITA). – Минск: БНТУ, 2019. – С. 18
8. Буров А.А., Е.В. Алгоритмы функционирования беспилотных городских пассажирских транспортных систем / А.А. Буров, Д.О. Бойко, Е.В. Швецова// Сборник конкурсных научных работ студентов и магистрантов. – Брест: Издательство БрГТУ, 2019. – С. 62-65
9. Буров, А.А. Алгоритм построения плана развозки пассажиров на маршруте / А.А. Буров, Д.О. Бойко, Е.В. Швецова// Сборник тезисов научной студенческой конференции "Неделя науки - 2019". – Брест: Издательство БрГТУ, 2019. – С. 11-12
10. Проект Safe Road Trains for the Environment (SARTRE) [Электронный ресурс].URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Safe\\_Road\\_Trains\\_for\\_the\\_Environment](http://en.wikipedia.org/wiki/Safe_Road_Trains_for_the_Environment) (дата обращения: 19.02.19 )
11. Пролиско, Е., Шуть, В. Динамическая модель работы транспортной системы «ИНФОБУС» // Материалы научно-технической конференции «Искусственный интеллект. Интеллектуальные транспортные системы», Брест, Беларусь, 2016, с. 49-54.
12. Касьяник, В., Шуть, В. 2012. Мобильный помощник водителя в выборе стратегии вождения. Искусственный интеллект, 3, Донецк: ИПИИ «Наука і освіта». с. 253-259.
13. Пролиско Е.Е., Шуть В.Н. Математическая модель работы «ИНФОБУСОВ» // Матеріали VII-ої Українсько-польської науково-практичної конференції «Електроніка та інформаційні технології (ЕЛІТ-2015)», (27-30 серпня) , Львів-Чинадієво, 2015 . с. 59-62.
14. Шуть, В., Пролиско, Е. 2016. Альтернативный метро транспорт на базе мобильных роботов. Штучний інтелект, 2 (72). с. 170-175.
15. Persia, L., Barnes J., Shuts V., Prolisko E., Kasjanik V., Kapskii D., Rakitski A. High capacity robotic urban cluster-pipeline passengers transport. Материалы Международной научно-технической конференции «Искусственный интеллект. Интеллектуальные транспортные системы (Be-Safe 2016)»