

УДК 656.13

Елена Владимировна Швецова, старший преподаватель кафедры интеллектуальных информационных технологий Брестского государственного технического университета (БрГТУ), Брест, Республика Беларусь, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-1613-6645>,

Василий Николаевич Шуть, кандидат технических наук, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий Брестского государственного технического университета (БрГТУ), Брест, Республика Беларусь, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-7979-6157>

## АЛГОРИТМ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗОК НА ОСНОВЕ КРИТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА МАТРИЦЫ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ

Elena Vladimirovna Shvetsova, Senior Lecturer, Intelligent Information Technologies Department, Brest State Technical University (BSTU), Brest, Belarus,

Vasiliy Nikolaevich Shut', PhD in Engineering, Associate Professor, Intelligent Information Technologies Department, Brest State Technical University (BSTU), Brest, Belarus

### The algorithm of transportation organization based on the critical element of a correspondence matrix

#### Аннотация

Рассмотрена пассажирская городская транспортная система на базе беспилотного автоматического транспорта малой вместимости, являющаяся замкнутой, т.е. функционирующей самостоятельно — без участия человека. Сбор, анализ данных и организация перевозок в такой системе осуществляются при помощи информационных технологий и интеллектуальных алгоритмов. Информационной основой для составления плана перевозок служит матрица корреспонденций.

Предложен алгоритм составления плана перевозок на основе матрицы корреспонденций, в которой выделяется критический элемент, соответствующий условию достаточного накопления заявок на перевозку. Кроме того, алгоритм предусматривает возможность дополнительного попутного подвоза пассажиров.

Показано, что предложенный алгоритм позволяет достичь уровня, сопоставимого с комфортом поездки в такси, но при этом экономический эффект от перевозки выше, чем у такси, за счет большего числа пассажиров, осуществляющих совместную поездку.

Рассмотренная модель направлена на повышение мобильности и гибкости пассажирских перевозок в условиях интенсивных транспортных потоков и отличается экономическими и экологическими выгодами, поскольку метод перевозки пассажиров беспилотными транспортными средствами обеспечивает высокую провозную способность городских транспортных систем и высокий уровень комфорта пассажиров на маршруте.

**Ключевые слова:** автоматический транспорт, информационно-транспортная система, матрица корреспонденций, алгоритм организации перевозок, инфобус.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-34-40

#### Abstract

The passenger urban transport system based on unmanned automatic transport of small capacity, which is closed, i.e. functioning independently — without human participation, is considered. Data collection, analysis and organization of transportation in such system are carried out using information technologies and intelligent algorithms. The correspondence matrix serves as an information basis for drafting a transportation plan.

An algorithm for drawing up a transportation plan based on the correspondence matrix is proposed, in which the critical element correlates with the condition of sufficient accumulation of requests for transportation. In addition, the algorithm provides the possibility of in-passing transportation of passengers.

It is demonstrated that the proposed algorithm makes it possible to achieve a level of comfort comparable to the comfort of a taxi ride, but at the same time, the economic effect of transportation is higher than that of a taxi, due to a larger number of passengers traveling together.

The considered model is aimed at increasing the mobility and flexibility of passenger transportation in conditions of high traffic flows and is distinguished by economic and environmental benefits, since the method of passenger transportation by unmanned vehicles provides high carrying capacity of urban transport systems with a high level of passenger comfort on the route.

**Keywords:** automatic transport, information and transport system, correspondence matrix, transportation arrangement algorithm, infobus.

## ВВЕДЕНИЕ

**Н**еуклонный рост городского населения приводит к необходимости пересмотра принципов городской мобильности в сторону доминирования общественного экологичного пассажирского транспорта, способного предоставлять уровень комфорта поездки, который будет сопоставим с комфортом поездки на частном автомобиле. Например, в некоторых странах (в США, Великобритании) появился такой вид транспорта, как Personal Rapid Transit (PRT), или ПАТ (персональный автоматический транспорт). Этот вид городского и пригородного транспорта автоматически (без водителя) перевозит пассажиров в режиме такси, используя сеть выделенных путей. Кроме того, на смену традиционным приходят транспортные системы нового типа, основанные на использовании интеллектуальных информационных и телекоммуникационных технологий, т.е. информационно-транспортные системы (ИТС). В статье представлены концепция ИТС на базе беспилотных транспортных средств и алгоритм организации ПАТ — перевозок на основе обработки матрицы корреспонденций.

## ИНФОРМАЦИОННО-ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЭЛЕКТРОКАРОВ

Подробно городская пассажирская информационно-транспортная система рассмотрена в работах [1–5].

Основная транспортная единица в ИТС — беспилотный электрокар малой вместимости (до 30 мест), называемый инфобусом. Инфобусы в автономном режиме совершают поездки по рельсовому пути фиксированным маршрутом из  $k$  остановок в двух направлениях. В начале и в конце каждого направления находятся накопители, в которых транспортные средства ожидают нового рейса, а также могут осуществить подзарядку. Перекрестки преодолеваются либо по эстакадам, либо по подземным тоннелям (рис. 1), тем самым инфобусы представляют собой транспортные средства с высшим приоритетом движения.

Движение инфобусов осуществляется как автономно, так и в составе кассеты, которая представляет собой транспортное средство с разделяющимися частями

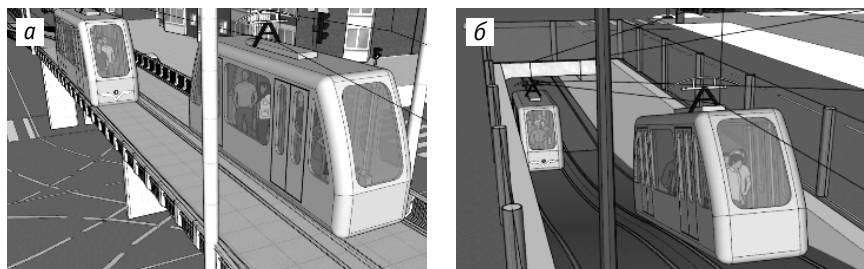


Рис. 1. Преодоление перекрестков:  
а — по эстакаде; б — по подземному тоннелю

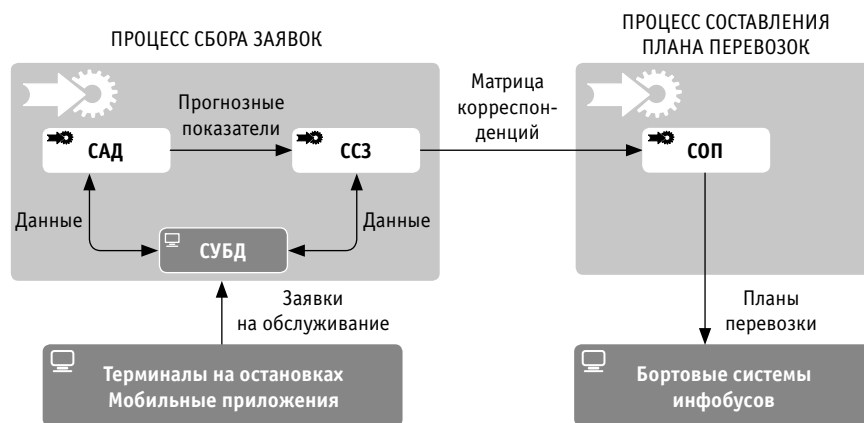


Рис. 2. Структура единого информационного сервера ИТС

ID	Origin	Destination	SeatsNumber	TimeRequest
integer	integer	integer	integer	timestamp without time zone
109122	3	7	1	2021-06-16 00:07:57.07
109130	8	10	1	2021-06-16 00:08:11.08
109131	2	7	1	2021-09-02 10:18:09.18
109135	4	7	1	2021-09-02 10:18:18.18
109137	4	10	1	2021-09-02 10:18:23.18
109141	1	5	1	2021-09-02 10:40:51.4
109142	8	9	1	2021-09-02 10:40:55.4

Рис. 3. Информация о сохраненных заявках в базе данных

ми [6–10]. В кассете, двигаясь совместно и синхронно, инфобусы образуют транспортное средство новой вместимости. При необходимости инфобус может отсоединиться от кассеты и продолжить движение самостоятельно.

Каждый инфобус оснащен бортовой системой, получающей управляющие сигналы от единого информационного сервера ИТС (рис. 2), включающего в себя систему сбора заявок (ССЗ), систему анализа данных (САД) и систему организации перевозок (СОП).

Сбор заявок от пассажиров на перевозку осуществляется через термина-

лы на остановках либо через мобильные приложения. Заявки пересылаются в ССЗ и сохраняются в базе данных в виде временного ряда (здесь под временным рядом понимается последовательность записей с информацией о заявках на перевозку, каждая из которых имеет временную метку, располагающую запись хронологически на «оси времени»). На рис. 3 показано, что каждая заявка характеризуется идентификатором (ID), остановкой отправления (Origin), остановкой назначения (Destination), числом посадочных мест (SeatsNumber), временем регистрации (TimeRequest).

На основе записей базы данных системой сбора заявок формируется матрица корреспонденций  $M_z, Z = 1, 2, \dots$ , в которой каждый элемент  $m_{ij}$  определяет число пассажиров, следующих с остановки  $i$  на остановку  $j, i (j = 1, \dots, k)$  (рис. 4). Здесь  $k$  — число остановок одного направления маршрута. Очевидно, что элементы матрицы  $M_z$  на главной диагонали и под главной диагональю равны нулю, так как предполагается, что пассажир не может выйти на остановке, на которой сел, и не может ехать назад.

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

Рис. 4. Матрица корреспонденций  $M_z$

Всякий раз при поступлении новой заявки в ССЗ система отслеживает выполнение условия достаточного накопления заявок (которое зависит от применяемого алгоритма организации перевозок). В предложенном в работе алгоритме достаточное накопление заявок наступает, когда некоторый элемент  $m_{i^*j^*}$  матрицы  $M_z$ , далее называемый критическим элементом, начинает удовлетворять условию

$$m_{i^*j^*} \geq a \cdot V, a \in [0.6, 1), i^* = \overline{1, k-1}, j^* = \overline{2, k}, \quad (1)$$

где  $V$  — число посадочных мест в инфобусе (далее — объем инфобуса);

$a$  — коэффициент эластичности, используемый для резерва мест потенциальных пассажиров, которые могут подойти на остановку от момента отправления транспортного средства из накопителя к моменту прибытия транспортного средства на остановку  $i^*$ .

Как только условие (1) выполняется, сервер на основе собранного временного ряда фиксирует матрицу корреспонденций, составляет по ней планы перевозки, которые сразу же пересылаются бортовым системам инфобусов (см. рис. 2).

План включает в себя определение числа инфобусов, участвующих в перевозке, остановки посадки-высадки пассажиров, идентификаторы заявок, которые будут обслужены в текущем плане перевозки, и графики движения транспортных средств (алгоритм составления графиков движения был подробно описан в [11, 12]).

В представленной статье рассматривается алгоритм составления плана перевозки для критического элемента матрицы корреспонденций. В перевозке по этому алгоритму участвует только один инфобус, основная цель которого — доставить пассажиров с остановки  $i^*$  на остановку  $j^*$ . Причем все пассажиры будут доставлены в нужный им пункт без промежуточных остановок. Во время следования от накопителя 1 до оста-

новки  $i^*$  и от остановки  $j^*$  до накопителя 2 инфобус, согласно алгоритму, совершает еще дополнительный подвоз пассажиров, что делает перевозку более эффективной.

### ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Фиксация матрицы корреспонденций системой сбора заявок сервера ИТС и начало составления плана перевозки наступают в момент, когда некоторый элемент  $m_{i^*j^*}$  матрицы ( $i^* < j^*, j^* = \overline{2, k}, i^* = \overline{1, k-1}$ ), называемый критическим элементом, начинает удовлетворять условию (1) (рис. 5). Это указывает на достаточное накопление пассажиров на остановке  $i^*$ , желающих ехать на остановку  $j^*$ . С остановки  $i^*$  все пассажиры забираются и перевозятся прямо на остановку  $j^*$  без промежуточных остановок.

При движении от накопителя к остановке  $i^*$  инфобус может также осуществить дополнительный подвоз пассажиров, желающих попасть с остановок  $1, \dots, (i^* - 1)$  на остановку  $i^*$ .

Элементы матрицы корреспонденций, соответствующие их заявкам, находятся в столбце  $i^*$  со строки 1 по строку  $(i^* - 1)$  (см. рис. 5), образуют множество заявок дополнительного подвоза  $J_{at}$  (additional transportation) и должны удовлетворять условию

$$\begin{cases} \sum_{1 \leq i \leq i^* - 1, i \in N} m_{ii^*} \rightarrow \max \\ \sum_{1 \leq i \leq i^* - 1, i \in N} m_{ii^*} \leq V. \end{cases} \quad (2)$$

$m_{11}$	$m_{12}$	...	...	...	$m_{1i^*}$	...	...	...	$m_{1j^*}$	...	...	$m_{1k-1}$	$m_{1k}$
0	0	$m_{23}$	...	...	$m_{2i^*}$	...	...	...	$m_{2j^*}$	...	...	$m_{2k-1}$	$m_{2k}$
0	0	0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	$m_{3k-1}$	$m_{3k}$
...	...	...	...	...	$m_{(i^*-1)i^*}$	...	...	...	...	...	...	...	...
0	0	0	0	0	...	...	...	...	$m_{i^*j^*}$	...	...	...	$m_{i^*k}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0	0	0	0	0	0	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$m_{k-1k}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 5. Матрица корреспонденций  $M_z$ , критический элемент и потенциальное множество дополнительного подвоза

Нахождение таких элементов в столбце  $i^*$  происходит итеративно: на каждой итерации среди элементов  $m_{ii^*}, 1 \leq i \leq i^* - 1$  выбирается максимальный элемент из еще не рассмотренных элементов, и если он в совокупности с отобранными на предыдущих итерациях элементами не превышает объем инфобуса, то добавляется к сумме  $\sum_{1 \leq i \leq i^* - 1, i \in N} m_{ii^*}$ . В противном случае

элемент исключается из рассмотрения. Формирование множества  $J_{at}$  продолжается либо до рассмотрения всех элементов  $m_{ij^*}, 1 \leq i \leq i^* - 1$ , либо до превышения суммой отобранных элементов объема инфобуса  $V$ . Остановки отправления, вошедшие во множество  $J_{ar}$  образуют множество остановок дополнительного подвоза  $S_{at}$  (stations of additional transportation).

Рассмотрим алгоритм формирования множеств  $J_{at}$  и  $S_{at}$  на примере матрицы корреспонденций  $M_z$ , представленной на рис. 6. При этом объем инфобуса  $V$  равен 25, число остановок маршрута — 14. Здесь критическим элементом выступает элемент  $m_{59}$ , равный 20.

Для дополнительного подвоза рассматриваются заявки на поездку на пятую остановку с предыдущих четырех, т.е. элементы  $m_{i5}, 1 \leq i \leq 4$ . Первым во множество  $J_{at}$  войдет элемент  $m_{15} = 15$ . Элемент  $m_{25} = 14$  исключается, так как в сумме с уже отобранным элементом превышает объем инфобуса  $V$ . На третьей итерации выбирается элемент  $m_{45} = 4$ , на четвертой —  $m_{35} = 3$ . На этом отбор заканчивается, поскольку все элементы  $m_{i5}, 1 \leq i \leq 4$  рассмотрены. Таким образом, сформировано множество заявок дополнительного подвоза  $J_{at} = \{m_{15}, m_{35}, m_{45}\} = \{15, 3, 4\}$  и множество остановок дополнительного подвоза  $S_{at} = \{1, 3, 4\}$ .

Так как инфобус будет останавливаться на остановках множества  $S_{ar}$  то можно еще осуществить перевозку пассажиров, желающих ехать с одной остановки множества  $S_{ar}$  на другую, при условии что они не будут составлять конкуренцию пассажирам дополнительного подвоза (в рассматриваемом случае, например, с первой остановки на третью или четвертую, с третьей на четвертую). Множество таких заявок назовем множеством заявок попутного подвоза (passing transportation)  $J_{pt}$ .

$$M_z = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 11 & \boxed{15} & 3 & 3 & 3 & 7 & 1 & 0 & 1 & 0 & 11 \\ 0 & 0 & 3 & 1 & 14 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \boxed{3} & 6 & 2 & 0 & 3 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{4} & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 4 & 2 & 1 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 8 & \boxed{20} & 1 & 7 & 5 & 3 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 7 & 1 & 0 & 7 & 2 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 4 & 2 & 0 & 2 & 1 & 14 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 & 2 & 7 & 6 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 10 & 5 & 4 & 12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 11 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Рис. 6. Критический элемент и элементы множества дополнительного подвоза  $J_{at}$

Множество  $J_{pt}$  определяется итерационно путем перебора всех ненулевых элементов  $m_{ij}, i, j \in S_{ar}, i < j$  матрицы  $M_z$  для которых выполняется условие

$$\begin{cases} m_{ij} < V - \sum_{s \in S_{at}, s < j} m_{si^*} - \sum_{m_{sk} \in J_{pt}} m_{sk} + \sum_{\substack{m_{sk} \in J_{pt} \\ s < i, k \leq i}} m_{sk} \\ i, j \in S_{at}, i < j \end{cases}, \quad (3)$$

где  $V$  — объем инфобуса;

$\sum_{s \in S_{at}, s < j} m_{si^*}$  — сумма элементов множества  $J_{ar}$  соответствующих заявкам пассажиров, которые должны занять места в инфобусе при его следовании от остановки  $i$  к остановке  $j$ ;

$\sum_{m_{sk} \in J_{pt}} m_{sk}$  — места, уже занятые определенными пассажирами попутного подвоза, эта сумма рекурсивно увеличивается на каждой итерации на элемент  $m_{ij}$  если он удовлетворяет условию (3);

$\sum_{m_{sk} \in J_{pt}, s < i, k \leq i} m_{sk}$  — объем освободившихся в салоне мест за счет вышедших пассажиров попутного подвоза до остановки  $i$  включительно, эта величина рассчитывается на каждой итерации алгоритма.

Алгоритм определения элементов попутного подвоза представлен в блок-схеме на рис. 7. В блок-схеме под  $\inf S_{at}$  (инфимум  $S_{at}$ ) подразумевается точная нижняя граница множества  $S_{ar}$  а под  $\sup S_{at}$  (супремум  $S_{at}$ ) — точная верхняя граница множества  $S_{ar}$ .

Рассмотрим нахождение заявок попутного подвоза для матрицы  $M_z$ , представленной на рис. 6. Согласно условию из системы (3)  $i, j \in S_{at} = \{1, 3, 4\}, i < j$ , потенциальные кандидаты на попутный подвоз  $m_{13}, m_{14}, m_{34}$ .

При анализе элемента  $m_{13}$  множество  $J_{pt}$  пусто, так как еще ни один элемент не определен для попутного подвоза. Пусто и множество вышедших пассажиров попутного подвоза на первой остановке  $\sum_{\substack{m_{sk} \in J_{pt} \\ s < 1, k \leq 1}} m_{sk}$ .

полнительного подвоза с остановки 1 до остановки 3 состоит из элемента  $m_{15} = 15$ :

$$\begin{aligned} m_{13} &= 2 \leq V - \sum_{m_{sk} \in J_{at}, s < 3} m_{sk} - \sum_{m_{sk} \in J_{pt}} m_{sk} + \sum_{\substack{m_{sk} \in J_{pt} \\ s < 1, k \leq 1}} m_{sk} = \\ &= 25 - 15 - 0 + 0 = 10 \Rightarrow J_{pt} = \{m_{13}\} = 2. \end{aligned}$$

Для элемента  $m_{14} = 11$  множество  $J_{pt} = \{m_{13}\} = \{2\}$ , множество элементов дополнительного подвоза с остановки 1 по остановку 4 будет состоять из  $\{m_{15}, m_{35}\} = \{15, 3\}$ . Вышедших пассажиров на первой остановке нет. Но, тем не менее, мест для пассажиров элемента  $m_{14}$  не хватит, и его заявки не войдут в попутный подвоз:

$$\begin{aligned} m_{14} &= 11 > V - \sum_{m_{s5} \in J_{at}, s < 4} m_{s5} - \sum_{m_{sk} \in J_{pt}} m_{sk} + \sum_{\substack{m_{sk} \in J_{pt} \\ s < 1, k \leq 1}} m_{sk} = \\ &= 25 - (15 + 3) - 2 + 0 = 5 \Rightarrow J_{pt} = \{m_{13}\}. \end{aligned}$$

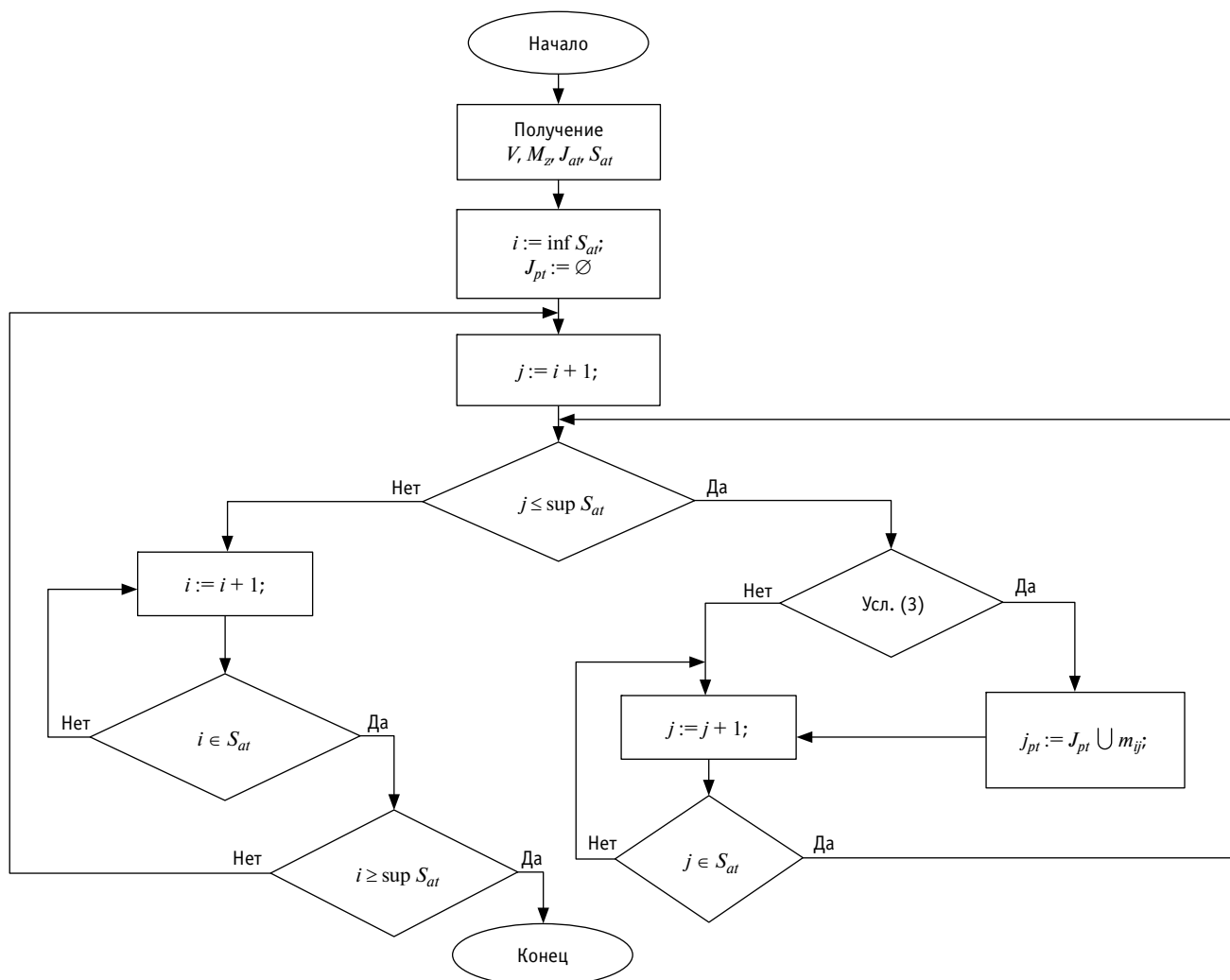


Рис. 7. Блок-схема алгоритма нахождения множества попутного подвоза  $J_{pt}$

Множество элементов дополнительного подвоза с остановки 3 по остановку 4 будет состоять из  $\{m_{15}, m_{35}\} = \{15, 3\}$ . Для элемента  $m_{34}$  множество  $J_{pt} = \{2\}$ . А сумма мест, освободившихся от вышедших пассажиров попутного подвоза,

$$\sum_{m_{sk} \in J_{pt}, s < 3, k \leq 3} m_{sk} = m_{13} = 2.$$

$$m_{34} = 1 \leq V - \sum_{m_{s5} \in J_{at}, s < 4} m_{sk} - \sum_{m_{sk} \in J_{pt}} m_{sk} + \sum_{m_{sk} \in J_{pt}, s < 3, k \leq 3} m_{sk} =$$

$$= 25 - (15 + 3) - 2 + 2 = 7 \Rightarrow J_{pt} = \{m_{13}, m_{34}\}.$$

Таким образом, элементы  $m_{13}$  и  $m_{34}$  включены в попутный подвоз, а инфобус, следуя на пятую остановку, перевезет дополнительно с первой, третьей и четвертой остановок  $m_{15} + m_{35} + m_{45} = 15 + 3 + 4 = 22$  пассажира. И попутно,

останавливаясь на этих остановках, перевезет  $m_{13} + m_{34} = 2 + 1 = 3$  пассажира.

По приезде на пятую остановку все пассажиры покинут салон транспортного средства. И в инфобус зайдут 20 пассажиров элемента  $m_{59}$ .

Перевезя с пятой на девятую остановку 20 пассажиров, инфобус может осуществить перевозку и на оставшемся участке маршрута. Для составления плана этой перевозки выбирается максимальный элемент  $m_{j^*j}, j > j^*$  в строке  $j^*$ . В рассматриваемом примере это  $m_{9,14} = 12$ . Он включается первым в новое множество дополнительного подвоза  $J_{at}$ .

Остальные элементы множества дополнительного подвоза выбираются в столбце  $j$  согласно совокупности требований

$$\begin{cases} m_{j^*j} + \sum_{j^* < s < j, s \in N} m_{sj} \rightarrow \max \\ m_{j^*j} + \sum_{j^* < s < j, s \in N} m_{sj} \leq V \end{cases} \quad (4)$$

Элементы выбираются итеративно: на каждой итерации необходимо найти наибольший элемент среди еще не рассмотренных из множества элементов  $m_{ij}$ ,  $j^* < i < j$ . Если элемент удовлетворяет условию (4), то он включается в  $J_{at}$  в противном случае исключается из рассмотрения.

Таким образом, в рассматриваемом примере  $J_{at} = \{m_{9,14}, m_{10,14}, m_{12,14}\} = \{12, 1, 11\}$ . Следовательно, множество остановок дополнительного подвоза  $S_{at} = \{9, 10, 12\}$ .

Множество заявок попутного подвоза находится согласно условию (3) и будет включать в себя элементы  $J_{pt} = \{m_{9,10}, m_{9,12}, m_{10,12}\} = \{6, 5, 1\}$ . Если на маршруте есть еще остановки, на которые можно осуществить дополнительный подвоз, то план перевозки составляется по этой же схеме. В рассматриваемом примере таких остановок нет.

Таким образом, полученный план перевозки включает в себя использование одного инфобуса, который осуществит посадку-высадку пассажиров на остановках 1, 3, 4, 5, 9, 10, 12, 14 маршрута, обслужив заявки на перевозку элементов матрицы корреспонденций  $M_z$ :  $m_{13}, m_{15}, m_{34}, m_{35}, m_{45}, m_{59}, m_{910}, m_{912}, m_{914}, m_{1012}, m_{1014}, m_{1214}$  (рис. 8).

Все элементы матрицы, не вошедшие в план перевозки, возвращаются в базу данных и вместе с накопленными к тому моменту заявками участвуют в формировании следующей матрицы корреспонденций.

Таким образом, организация перевозки по предложенному алгоритму состоит из следующих этапов:

- определения критического элемента  $m_{i^*j^*}$ ;
- определения плана перевозки для дополнительного и попутного подвоза при подъезде к остановке  $i^*$ ;
- определения планов перевозки (их может быть несколько) для дополнительного и попутного подвоза от остановки  $j^*$  до конца маршрута после осуществления основной перевозки заявок  $m_{i^*j^*}$ .

$$M_z = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \boxed{2} & 11 & \boxed{15} & 3 & 3 & 3 & 7 & 1 & 0 & 1 & 0 & 11 \\ 0 & 0 & 3 & 1 & 14 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & \boxed{1} & \boxed{3} & 6 & 2 & 0 & 3 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{4} & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 4 & 2 & 1 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 8 & \boxed{20} & 1 & 7 & 5 & 3 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 7 & 1 & 0 & 7 & 2 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 4 & 2 & 0 & 2 & 1 & 14 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 & 2 & 7 & 6 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{6} & 10 & \boxed{5} & 4 & \boxed{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & \boxed{1} & 1 & \boxed{1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & \boxed{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Рис. 8. Заявки, вошедшие в план перевозки на матрице корреспонденций

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый тип городских общественных перевозок с использованием автоматического транспорта. Этот вид транспорта может без помех со стороны других транспортных средств перемещаться в насыщенной улично-дорожной среде. Описанная транспортная система способна функционировать самостоятельно без участия человека и за счет постоянного сбора и обработки информации адаптивно реагировать на колебания спроса на перевозки.

Рассмотрен алгоритм организации перевозок с использованием автоматического транспорта, позволяющий обеспечить уровень комфорта поездки, сопоставимый с поездкой в такси (пассажир во время поездки делает минимальное число ненужных ему промежуточных остановок либо не делает таковых вовсе). При этом за счет большего числа пассажиров эффективность поездки выше, чем у такси.

### Литература

1. Shuts V., Shviatsova A. System of urban unmanned passenger vehicle transport // ICCPT 2019: Current Problems of Transport: Proceedings of the 1st International Scientific Conference. Ternopol : TNTU, 2019. Pp. 174–184.
2. Shviatsova A., Shuts V. The Smart Urban Transport System // Research Papers Collection of Open Semantic Technologies for Intelligent System. Minsk : Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020. Pp. 349–352.
3. Shviatsova A., Shuts V. The smart urban transport system based on robotic vehicles // Штучний інтелект. 2019. № 3–4 (85–86). С. 40–49. ISSN 1561-5359.
4. Шуть В. Н., Швецова Е. В. Суперскоростная роботизированная интеллектуальная транспортная система городской перевозки пассажиров // Университет — территория опережающего развития : сборник научных статей, посвященный 80-летию Гродненского государственного университета им. Янки Купалы. Гродно : ГрГУ, 2020. С. 146–149.
5. Швецова Е. В., Глущенко Т. А. Пассажирская транспортная система для новой городской мобильности // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании,

### References

1. Shuts V., Shviatsova A. System of urban unmanned passenger vehicle transport // ICCPT 2019: Current Problems of Transport : Proceedings of the 1st International Scientific Conference. Ternopol : TNTU, 2019. Pp. 174–184.
2. Shviatsova A., Shuts V. The Smart Urban Transport System // Research Papers Collection of Open Semantic Technologies for Intelligent System. Minsk : Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020. Pp. 349–352.
3. Shviatsova A., Shuts V. The smart urban transport system based on robotic vehicles // Artificial Intelligence. 2019. No. 3–4 (85–86). Pp. 40–49. ISSN 1561-5359.
4. Shut' V. N., Shvetsova E. V. Super-fast robotic intelligent transport system for urban passenger transportation [Superskorostnaya robotizirovannaya intellektual'naya transportnaya sistema gorodskoy perevozki passazhirov] // The University is a territory of advanced development : collection of scientific articles dedicated to the 80th anniversary of Yanka Kupala State University of Grodno. Grodno : YKSUG, 2020. Pp. 146–149.
5. Shvetsova E. V., Glushhenko T. A. Passenger transport system for new urban mobility [Passazhirskaya transportnaya sistema dlya novoy gorodskoy mobil'nosti] // New mathematical methods and computer

производстве и научных исследованиях : материалы XXIII республиканской научной конференции студентов и аспирантов, Гомель, 23–25 марта 2020 г. Гомель : Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, 2020. С. 181–182.

6. Жогал А. Н., Шуть В. Н., Швецова Е. В. Автоматический городской интеллектуальный пассажирский транспорт // Транспорт и инновации: вызовы будущего : материалы Международной научной конференции. Минск : Национальная библиотека Беларуси, 2019. С. 23–33.
7. Шуть В. Н., Пролиско Е. Е., Швецова Е. В. Автоматизированная система управления разделяющимся пассажирским транспортом // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2019) : доклады XVIII Международной конференции, Минск, 21 ноября 2019 г. Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2019. С. 176–180.
8. Shviatsova A., Shuts V. The cassette method principles of passengers transportation through the intelligent transportation system // Штучний інтелект. 2020. № 1. С. 14–18. ISSN 1561-5359.
9. Швецова Е. В., Шуть В. Н. Интеллектуальный транспорт с разделяющимися частями // Математические методы в технике и технологиях : сборник трудов XXXIII Международной научной конференции. Т. 3. Санкт-Петербург : Изд-во СПбПУ, 2020. С. 87–93.
10. Shviatsova A., Shuts V. The Intellectual Transport with Divisible Parts // Society 5.0: Human-Centered Society Challenges and Solutions. Springer, 2022. Pp. 265–274.
11. Shuts V., Shviatsova A. The drawing up of the motion schedule in the intelligent urban passenger transport system // Штучний інтелект. 2021. № 2. С. 104–109. ISSN 1561-5359.
12. Швецова Е. В., Шуть В. Н. О построении графика движения транспортных средств в городской пассажирской транспортной системе // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2021. № 2 (43). С. 21–24. ISSN 2227-1120.

technologies in design, production and scientific research : proceedings of the 23rd Republican scientific conference for students and postgraduate students, Gomel, March 23–25, 2020. Gomel : Francisk Skorina Gomel State University, 2020. Pp. 181–182.

6. Zhogal A. N., Shut' V. N., Shvetsova E. V. Automatic urban intelligent passenger transport [Avtomaticheskiy gorodskoy intellektual'nyy passazhirskiy transport] // Transport and innovations: challenges of the future : proceedings of the International scientific conference. Minsk : National Library of Belarus, 2019. Pp. 23–33.
7. Shut' V. N., Prolisko E. E., Shvetsova E. V. Automated control system of separating passenger transport [Avtomatizirovannaya sistema upravleniya razdelyayushhimsya passazhirskim transportom] // Development of informatization and state system of scientific and technical information (RINTI-2019) : reports of the 18th International conference, Minsk, November 21, 2019. Minsk : United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, 2019. Pp. 176–180.
8. Shviatsova A., Shuts V. The cassette method principles of passengers transportation through the intelligent transportation system // Artificial Intelligence. 2020. No. 1. Pp. 14–18. ISSN 1561-5359.
9. Shvetsova E. V., Shut' V. N. The intellectual transport with divisible parts [Intellektual'nyy transport s razdelyayushhimsya chastyami] // Mathematical methods in engineering and technology : proceedings of the 33rd International scientific conference. Vol. 3. St. Petersburg : Publishing House of SPbPU, 2020. Pp. 87–93.
10. Shviatsova A., Shuts V. The Intellectual Transport with Divisible Parts // Society 5.0: Human-Centered Society Challenges and Solutions. Springer, 2022. Pp. 265–274.
11. Shuts V., Shviatsova A. The drawing up of the motion schedule in the intelligent urban passenger transport system // Artificial Intelligence. 2021. No. 2. Pp. 104–109. ISSN 1561-5359.
12. Shvetsova E. V., Shut' V. N. On building a schedule for the movement of vehicles in the urban passenger transport system [O postroenii grafika dvizheniya transportnykh sredstv v gorodskoy passazhirskoy transportnoy sisteme] // Bulletin of BSUT: science and transport. 2021. No. 2 (43). Pp. 21–24. ISSN 2227-1120.

Объем статьи 0,8 авторских листа