

УДК 656.13

Е. В. ШВЕЦОВА, В. Н. ШУТЬ кандидат технических наук, Брестский государственный технический университет

## О ПОСТРОЕНИИ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В ГОРОДСКОЙ ПАССАЖИРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ

Описана структура и функционирование информационно-транспортной системы (ИТС), базирующейся на использовании беспилотных электрокаров, рассмотрены принципы построения графика движения транспортных средств при выполнении плана перевозки пассажиров, который, как и план перевозки, формируется в режиме реального времени. Транспортные средства осуществляют движение по выделенному пути последовательно друг за другом без обгонов. График должен обеспечивать «бесконфликтное» движение транспортных средств в транспортной системе, т. е. впереди идущее транспортное средство не должно задерживать следующее за ним.

**Введение.** Современные городские общественные транспортные перевозки имеют следующие недостатки: принятие неэффективных решений диспетчеризации из-за отсутствия своевременной и точной информации о спросе на перевозку; сложившаяся номенклатура транспортных средств ориентирована на удовлетворение спроса на перевозку в пиковые моменты работы транспортной системы, что приводит к их неэффективному использованию в периоды спада спроса на перевозку.

Данные проблемы могут быть успешно решены с помощью внедрения информационно-транспортных систем (ИТС), использующих современные интеллектуальные технологии, которые способны выполнять сбор и анализ данных о спросе на перевозку в режиме реального времени, а также при использовании автономных транспортных модулей малой вместимости, которые могут объединяться в автокараваны [1]. Можно привести внедряемые зарубежные проекты городских пассажирских транспортных систем, строящиеся на принципах автономных передвижных модулей, способных при необходимости объединяться и двигаться совместно: Next Future Transportataion (США – Италия) [2] и DART (Dynamic Autonomous Rapid Transit, Сингапур) [3].

Использование транспорта с разделяющимися частями на основе автономных транспортных модулей позволит увеличить степень своевременного удовлетворения спроса на перевозку при максимально рациональном использовании ресурсов транспортной системы.

Целью данной работы является описание принципов построения графика движения транспортных средств в режиме реального времени в ИТС на базе беспилотных электрокаров в соответствии с планом перевозки пассажиров.

Подробно городская пассажирская ИТС на базе беспилотных электрокаров, называемых инфобусами, описана в работах [4–12] и включает в себя:

- парк беспилотных транспортных средств небольшой вместимости (6–21 место) – инфобусов. Каждый инфобус управляется собственной бортовой компьютерной системой, получающей управление от единого информационного сервера ИТС. Движение транспортных средств осуществляется по выделенному пути, что делает движение высокоприоритетным. Преодоление перекрестков инфобусами происходит светофорным регулированием (по «зеленой волне»), устройством эстакад (рисунок 1, а) либо по подземным туннелям (рисунок 1, б).

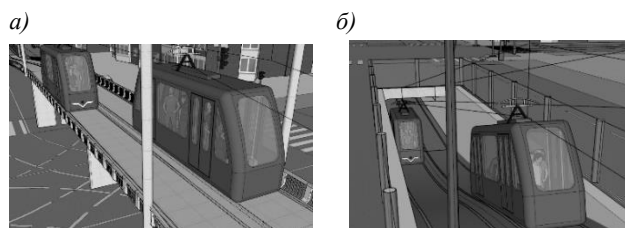


Рисунок 1 – Движение инфобусов:  
а – по эстакаде; б – по туннелю

Инфобусы могут двигаться как отдельно, так и совместно в кассете (по принципу автокаравана), образуя транспортное средство с разделяющимися частями [4], что позволяет формировать транспортное средство нужной вместимости;

- маршрут движения инфобусов содержит по  $k$  остановок в двух направлениях, места сбора инфобусов (Накопитель 1 и Накопитель 2), из которых инфобусы начинают выполнение плана перевозки и в которые возвращаются после его реализации;

- система терминалов на остановках и мобильное приложение, позволяющие осуществлять сбор заявок на перевозку;

- информационный сервер ИТС (ИС ИТС), являющийся программно-аппаратным комплексом, отвечающим за сбор, анализ заявок пассажиров и организацию перевозок пассажиров в режиме реального времени. Результатом процесса организации перевозок является составленный план перевозок, который пересылается бортовым системам инфобусов для выполнения. Программными элементами ИС ИТС являются следующие системы: система сбора заявок (ССЗ), система анализа данных (САД) и система организации перевозок (СОП).

Функционирование ССЗ строится на использовании стационарных терминалов на остановках и приложений для смартфонов, с помощью которых пассажиры могут зарегистрировать заявки на перевозку в ИТС. На уровне хранения данных ССЗ находится система управления базами данных временных рядов (Time Series Data Base, TSDB), т. к. поток заявок от пассажиров можно рассматривать как дискретный временной ряд (здесь под временным рядом понимается последовательность наблюдений, хронологически размещенных на оси времени. Если время замеряется дискретно, то и ряд называется дискретным). Современные TSDB поддерживают высокопроизводительную вставку и обработку данных и с успехом используются в высоконагруженных распределенных системах, которой является и рассматриваемая ИТС.

САД предоставляет аналитику накопленных исторических данных: информацию о корреспонденциях, изменении интенсивности спроса на перевозку в разрезе времени суток; дня недели или месяца; праздничных, предпраздничных дней и т. д. Данная аналитика используется для организации адаптивного перевозочного процесса, основой которого является матрица корреспонденций  $M$  (рисунок 2), формирующаяся на основе заявок, накапливаемых транспортной системой в режиме реального времени. Каждый элемент матрицы  $m_{ij}$  есть сумма числа мест в заявках на перевозку с остановки  $i$  на остановку  $j$  и прогнозного показателя, определяющего объем потенциальных заявок на перевозку, которые будут зарегистрированы в системе за время от момента конца сбора заявок до момента прибытия транспортного средства на остановку [10].

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

Рисунок 2 – Матрица корреспонденций

Сформированная матрица корреспонденций передается в СОП для составления плана перевозки пассажиров. План перевозки составляется на основе полученной матрицы корреспонденций для каждого транспортного средства, участвующего в выполнении перевозок по текущей матрице и включает в себя идентификационный номер для каждого инфобуса; остановку-источник (начальную остановку, с которой инфобус первоначально заберет пассажиров); множество целевых остановок (на которые инфобус повезет пассажиров); график движения для каждого транспортного средства. Сформированные планы перевозки пересылаются бортовым системам инфобусов для выполнения.

На рисунке 3 приведена схема функционирования ИТС.

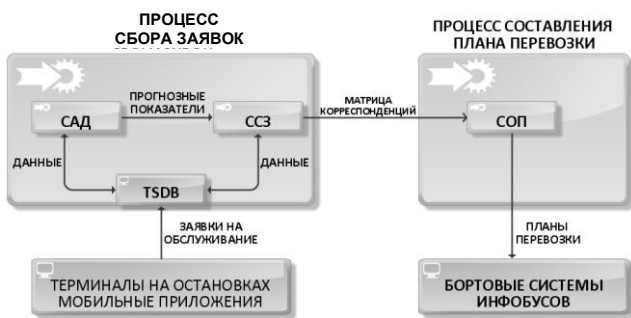


Рисунок 3 – Схема функционирования ИТС

**Составление графика движения транспортных средств.** Рассматриваемая ИТС относится к классу PRT-систем (Personal Rapid Transit), характерной чертой которых являются перевозки в режиме *источник – назначение (origin-destination)*, где *источник* – остановка, на которой пассажир сел, а *назначение* – куда пассажир едет. При таком способе перевозок пассажир, в отличие от перевозки классическим городским общественным транспортом, добирается до остановки-назначения с минимальным числом промежуточных

остановок, на которых ему не нужно выходить. Поэтому каждый инфобус, участвующий в плане перевозки, составленном по матрице корреспонденций, помимо идентификационного номера  $n_i$  (где  $n$  – порядковый номер следования инфобуса, а  $i$  – остановка-источник) получает также остановку-источник и множество целевых остановок  $J_{n_i}$ , на которые он повезет пассажиров, севших на остановке  $i$ .

Движение транспортных средств на маршруте должно быть преимущественно бесконфликтным, т. е. инфобусы не должны задерживать друг друга. В работе [12] был сформулирован критерий, позволяющий обнаружить потенциальные конфликты следования и разрешить их на этапе составления графика движения для транспортных средств. Здесь под конфликтом следования понимается ситуация, когда позади идущее транспортное средство вынуждено простаивать из-за задержек, связанных со следованием впереди идущего.

Множество целевых остановок любого инфобуса  $J_{n_i}$  имеет свою мощность, что напрямую влияет на время простоя, которое будет потрачено инфобусом на остановочных пунктах и может быть найдено из соотношения  $(|J_{n_i}|+1)t_{st}$ , где  $t_{st}$  – время простоя на остановочном пункте (величина известна и постоянна), а единица, прибавляемая к значению мощности, подразумевает остановку-источник. Под временем накопленного простоя на остановке  $j$ ,  $j = \overline{1, k}$  понимается совокупное время, потраченное на простой на предыдущих остановках, остановке  $j$ , включая простой на самой остановке  $j$ . Время накопленного простоя инфобусов, движущихся с одинаковой скоростью, влияет на их сближение-удаление во время следования. Конфликт следования случается на остановке, на которой накопленное время простоя впереди идущего инфобуса превысит время накопленного простоя позади идущего, и решается путем смещения по времени старта последующего инфобуса относительно предыдущего таким образом, чтобы исключить задержки последнего. В данном разделе рассматриваются принципы построения графика движения инфобусов, обеспечивающего это.

Для каждого инфобуса  $n_i$  при составлении плана перевозки наряду с множеством остановок  $J_{n_i}$  составляется вектор времени прибытия на остановочные пункты  $d_{n_i} = (d_{n_i}^0, d_{n_i}^1, \dots, d_{n_i}^{j-1}, d_{n_i}^j)$ ,  $j = \overline{1, k}$  и вектор отправлений с них  $a_{n_i} = (a_{n_i}^0, a_{n_i}^2, a_{n_i}^3, \dots, a_{n_i}^{j-1}, a_{n_i}^j)$ ,  $j = \overline{1, k}$ , где  $d_{n_i}^j, a_{n_i}^j$  – время отправления с остановки  $j$  и прибытия инфобуса на остановку  $j$  инфобуса  $n_i$  соответственно.

Для нахождения координат векторов  $d_{n_i}, a_{n_i}$  вводится вектор расстояний от Накопителя 1 до остальных остановок маршрута и Накопителя 2, координаты которого известны и постоянны (координата, соответствующая Накопителю 1 принимается равной 0, а Накопителю 2 –  $(k+1)$ ):

$$S = (0, S_{01}, S_{02}, \dots, S_{0k}, S_{0k+1}), \quad (1)$$

где  $S_{0j}$ ,  $j = \overline{1, k+1}$  – расстояние между остановкой 0 и остановкой  $j$ .

Вектор времени достижения остановок маршрута при безостановочном движении инфобуса  $t = (0, t_{01}, t_{02}, \dots, t_{0k+1})$  находятся из соотношения

$$t = (t_{00}, t_{01}, t_{02}, \dots, t_{0k+1}) = \left( 0, \frac{s_{01}}{v}, \frac{s_{02}}{v}, \dots, \frac{s_{0k+1}}{v} \right), \quad (2)$$

где  $v$  – скорость движения инфобусов, являющаяся постоянной и известной заранее величиной.

Тогда координаты  $d_{n_i}^j$  и  $a_{n_i}^j$ ,  $j = \overline{1, k+1}$ , вектора прибытий  $d_{n_i}$  и вектора отправлений  $a_{n_i}$ , инфобуса  $n_i$ , участвующего в выполнении плана перевозки, соответственно

$$d_{n_i}^j = t_{start} + t_{0j} + t_{st} \cdot q_{n_i}^j, \quad j = \overline{0, k+1}; \quad (3)$$

$$a_{n_i}^j = \begin{cases} t_{start} + t_{0j} + t_{st} (q_{n_i}^j + 1), & j = \overline{1, k+1}, j \in J_{n_i}, \\ d_{n_i}^j, & j \notin J_{n_i}. \end{cases} \quad (4)$$

где  $t_{start}$  – время начала выполнения текущего плана перевозки, формирующееся в СОП в результате выполнения процесса составления плана перевозки (рисунок 3) как сумма момента фиксации составленного плана перевозки в системе, времени на рассылку этого плана бортовым системам инфобусов (данная величина постоянна и известна) и времени приведения бортовыми системами инфобусов в готовность к выполнению плана перевозки транспортных средств (данная величина постоянна и известна);  $t_{0j}$  – соответствующая остановке координата вектора  $t$ ;  $t_{st}$  – время простоя на остановке (величина постоянная и известная);  $q_{n_i}^j$  – количество стоянок, сделанных инфобусом до остановки  $j$ .

Таким образом, величина  $t_{st}(q_{n_i}^j + 1)$  соответствует накопленному времени простоя инфобуса к остановке  $j$ . Если остановка  $j$  входит в множество целевых остановок инфобуса  $J_{n_i}$ , то время отправления транспортного средства с нее увеличивается на  $t_{st}$  по отношению к времени  $d_{n_i}^j$ , в противном случае  $a_{n_i}^j = d_{n_i}^j$ , т. е. инфобус проезжает данную остановку, не останавливаясь.

На бесконфликтность следования двух инфобусов, движущихся последовательно, указывает неотрицательность всех координат разности векторов времени прибытия  $d_{n_i}$  позади идущего инфобуса  $n_i$  ( $i$  – остановка-источник для инфобуса  $n_i$ ) и вектора времени отправлений  $a_{(n-1)_i^*}$  впереди идущего инфобуса  $(n-1)_i^*$ , где  $i^*$  – остановка-источник этого инфобуса:

$$d_{n_i} - a_{(n-1)_i^*} = (d_{n_i}^0 - a_{(n-1)_i^*}^0, \dots, d_{n_i}^{k+1} - a_{(n-1)_i^*}^{k+1}), \quad (5)$$

$$i, i^* = \overline{1, k-1}.$$

Отрицательность координат вектора  $d_{n_i} - a_{(n-1)_i^*}$  указывает на то, что последующий инфобус  $n_i$  согласно составленному плану перевозки прибывает на соответствующие этим координатам остановки раньше предыдущего инфобуса  $(n-1)_i^*$ , чего быть не может.

Для исключения конфликтов следования при составлении графика движения находится максимальный

модуль среди отрицательных координат вектора  $d_{n_i} - a_{(n-1)_i^*}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta = \max \{ |d_{n_i}^j - a_{(n-1)_i^*}^j| \}; \\ (d_{n_i}^j - a_{(n-1)_i^*}^j) < 0; j = \overline{0, k+1}; i, i^* = \overline{1, k-1}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Найденное значение прибавляется ко всем координатам векторов  $d_{n_i}$  и  $a_{n_i}$  (инфобуса  $n_i$ , идущего позади), что приводит к смещению по времени старта инфобуса  $n_i$  по отношению к предыдущему инфобусу  $(n-1)_i^*$  на промежуток времени  $\Theta$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{n_i} = (d_{n_i}^0 + \Theta, d_{n_i}^1 + \Theta, \dots, d_{n_i}^{k+1} + \Theta); \\ a_{n_i} = (a_{n_i}^0 + \Theta, a_{n_i}^1 + \Theta, \dots, a_{n_i}^{k+1} + \Theta). \end{array} \right. \quad (7)$$

Таким образом, получаем график движения последующего инфобуса по отношению к предыдущему, который обеспечивает бесконфликтное следование.

Рассмотрим составление графика движения для двух инфобусов, которые должны проследовать друг за другом при реализации плана перевозки.

Маршрут следования будет состоять из семи остановок ( $k = 7$ ), расстояния в метрах от накопителя 1 до остановок задаются вектором  $S = (0, 110, 1540, 2530, 3960, 5500, 6270, 7370, 7590)$ , где первая координата вектора соответствует нахождению в Накопителе 1, а последняя, т. е. девятая – нахождению в Накопителе 2. Время стоянки инфобуса  $t_{st} = 20$  с. скорость движения инфобусов  $v = 40$  км/ч  $\approx 11$  м/с. Пусть  $t_{start}$  для простоты рассуждений равно нулю.

Из формулы (2) следует, что координаты вектора времени движения до остановочных пунктов маршрута от Накопителя 1, выраженные в секундах,

$$t = (0, t_{12}, \dots, t_{1k}) = (0, 10, 140, 230, 360, 500, 570, 670, 690).$$

Пусть в реализации плана перевозки участвуют два инфобуса  $1_1$  (следует первым по порядку и имеет первую остановку маршрута в качестве остановки-источника) и  $2_3$  (соответственно, второй по порядку с остановкой источником под номером три), множества целевых остановок для которых следующие:  $J_{1_1} = \{5, 6, 7\}$ ,

$J_{2_3} = \{4, 5\}$ . Таким образом, первый инфобус забирает пассажиров с первой остановки маршрута и везет их на остановки 5, 6, 7, а второй забирает пассажиров с третьей остановки и везет на остановки 4 и 5. И при одинаковой скорости движения и одновременном старте из Накопителя 1 первый инфобус начнет задерживать второй уже на первой остановке, т. к. его время накопленного простоя больше. В этом можно убедиться, найдя векторы времени прибытий и отправлений инфобусов:

$$d_{1_1} = (0, 10, 160, 250, 380, 520, 610, 730, 770);$$

$$a_{1_1} = (0, 30, 160, 250, 380, 540, 630, 750, 770);$$

$$d_{2_3} = (0, 10, 140, 230, 380, 540, 610, 710, 730);$$

$$a_{2_3} = (0, 10, 140, 250, 400, 560, 610, 710, 730).$$

На основании полученных данных построена диаграмма движения инфобусов (рисунок 4).

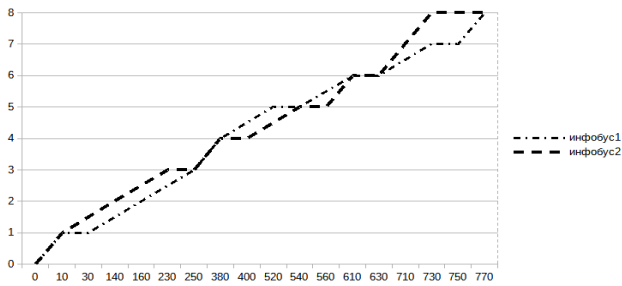


Рисунок 4 – Диаграмма движения инфобусов

Из диаграммы (см. рисунок 4) видно, что инфобус 2<sub>3</sub>, идущий позади, будет задерживаться инфобусом 1<sub>1</sub> на промежутках маршрута от остановки 1 и до остановки 3 и от остановки 6 и вплоть до Накопителя 2.

Для исключения конфликтов следования при выполнении плана перевозки находится разность координат вектора прибытия на остановки инфобуса 2<sub>3</sub> и вектора отправления с остановок инфобуса 1<sub>1</sub>, а также величина  $\Theta$  согласно формулам (5), (6):

$$d_{2_3} - a_{1_1} = (0, -20, -20, 0, 0, 0, 0, -20, -40),$$

$$\Theta = \max\{|-20|, |-40|\} = 40.$$

Таким образом, чтобы исключить задержку инфобуса 2<sub>3</sub>, необходимо отложить время его старта на 40 секунд, в результате чего координаты векторов  $d_{2_3}$  и  $a_{2_3}$  принимают вид

$$d_{2_3} = (0, 40, 180, 270, 420, 580, 650, 750, 770);$$

$$a_{2_3} = (0, 40, 180, 290, 440, 600, 650, 750, 770).$$

Бесконфликтное следование транспортных средств отражено на диаграмме движения на рисунке 5.

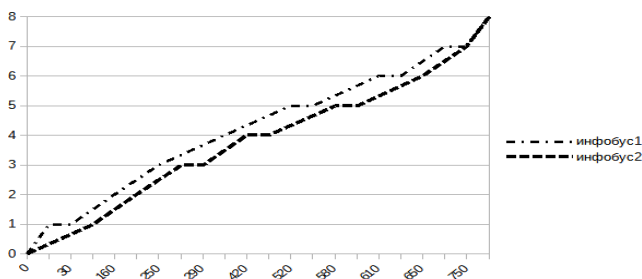


Рисунок 5 – Диаграмма движения инфобусов

Из рисунка 5 видно, что на протяжении всего следования от первой и до седьмой остановки маршрута между инфобусами будет существовать дистанция. На седьмой остановке инфобусы объединятся в кассету и так совместно прибудут в Накопитель 2.

Описанные принципы составления графика движения транспортных средств при выполнении плана перевозки в ИТС на базе беспилотных электрокаров позволяют спланировать время старта, прибытия и отправления

Получено 11.10.2021

**A. V. Shviatsova, V. N. Shuts.** On building a schedule for the movement of vehicles in the urban passenger transport system.

The article describes the structure and functioning of the information and transport system (ITS), based on the use of unmanned electric cars, and discusses the principles of building a schedule for the movement of vehicles in the implementation of the passenger transportation plan, which, like the transportation plan, is formed in real time. Vehicles move along a dedicated path sequentially one after another without overtaking. The schedule should ensure "conflict-free" movement of vehicles in the transport system, i.e. the vehicle in front must not hold the one following it.

инфобусов таким образом, чтобы они во время своего движения по маршруту не задерживали друг друга.

#### Список литературы

1 Проект Safe Road Trains for the Environment (SARTRE) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://en.wikipedia.org/wiki/Safe\\_Road\\_Trains\\_for\\_the\\_Environment](http://en.wikipedia.org/wiki/Safe_Road_Trains_for_the_Environment). – Дата доступа : 08.04.2021.

2 Next Future Transportation [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.next-future-mobility.com>. – Дата доступа : 30.04.2021.

3 Towards the Ultimate Public Transport System. Date Views. – Режим доступа : [www.tum-create.edu.sg/content/towards-ultimate-public-transport-system-0](http://www.tum-create.edu.sg/content/towards-ultimate-public-transport-system-0). – Дата доступа : 22.07.2021.

4 Интеллектуальный транспорт с разделяющимися частями // Математические методы в технике и технологиях-ММТТ. – 2020. – Т. 3. – С. 87–93.

5 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 – P. 172–184.

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. – P. 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). – Minsk : BNTU, 2019. – P. 18.

8 Швецова, Е. В. Алгоритмы выбора остановок доставки инфобуса для посадки пассажиров // Вестник Брестского государственного технического университета / Физика, математика, информатика. – Брест : БГТУ, 2019. – 5(118)2019. – С. 50–53.

9 Shviatsova, A. The Smart Urban Transport System / A. Shviatsova, V. Shuts // Research Papers Collection of Open Semantic technologies for Intelligent System. – Minsk : Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020. – P. 349–352.

10 Швецова, Е. В. Планирование и организация перевозочного процесса в интеллектуальной городской пассажирской транспортной системе / Е. В. Швецова // Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте: материалы III Всероссийской науч.-практ. конф. (Самара, 26–27 января 2021 г.). – Самара, 2021. – С. 133–136.

11 Shviatsova, A. The cassette method principles of passengers transportation through the intelligent transportation system / A. Shviatsova, V. Shuts // National Academy of Sciences of Ukraine Institute of Artificial Intelligence Problems ARTIFICIAL INTELLIGENCE. – 2020. – No. 1. – Kiev : Science and Education, 2020. – P. 14–18.

12 Shviatsova, A. The criterion of arising motion conflict of un-manned vehicles during implementing transportation plan in intelligent urban passenger transportation system / A. Shviatsova, V. Shuts // National Academy of Sciences of Ukraine Institute of Artificial Intelligence Problems ARTIFICIAL INTELLIGENCE. – Kiev : Science and Education, 2020. – No. 3. – P. 82–86.