

УДК 004.4:681.51

DOI 10.52928/2070-1624-2026-46-1-10-20

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА
ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗОК**

Е. В. ШВЕЦОВА, канд. техн. наук, доц. **В. Н. ШУТЬ**
(Брестский государственный технический университет)

A. Shviatsova ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1613-6645>

V. Shuts ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4310-8284>

Рассматривается интеллектуальная информационная система организации перевозок (ИИСОП), реализующая новый подход в организации транспортного процесса, заключающийся в непрерывном автоматическом воспроизведении цикла «мониторинг спроса на перевозку – анализ данных – адаптивная реакция транспортной системы». Предложена концепция интеллектуальной системы перевозок (ИСП) как объекта управления ИИСОП. Проанализированы основные принципы работы ИСП, математическое обеспечение ИИСОП, включающее математические модели интеллектуальных алгоритмов организации перевозок, триггерные условия их запуска и систему оценки эффективности, позволяющую в реальном времени находить оптимальный план перевозки на основе конкурентного выбора среди предложенных вариантов. Описано программное обеспечение ИИСОП, функциональность которого базируется на математическом обеспечении. Представлены экспериментальные результаты испытаний, свидетельствующие о преимуществах организации перевозок посредством ИИСОП.

Ключевые слова: интеллектуальная информационная система организации перевозок, интеллектуальные алгоритмы организации перевозок, интеллектуальные транспортные системы, матрица корреспонденций, комбинированная перевозка, интеллектуальное управление перевозками, инфобус.

Введение. Современное управление транспортным процессом строится на ретроспективных данных о спросе на перевозку, от актуальности которых зависит эффективность работы транспортной системы [1, с. 27–57]. Так, в пассажирских перевозках ключевые параметры (пассажировместимость транспортных средств, интервалы движения) пересчитываются с периодичностью от полугода до нескольких лет. Полученные параметры используются на протяжении всего периода до появления новых данных. Подобная модель управления приводит к слабой адаптивности транспортной системы (система перестраивает свою модель работы лишь в ответ на триггерные события). Таким образом, ключевой проблемой транспортной сферы является недостаточная адаптивность, обусловленная слабой автоматизацией и ограниченными возможностями человеческого фактора, что в совокупности приводит к реактивному поведению и сниженной эффективности работы.

Сегодня наблюдается значительный разброс в уровнях организации транспортного процесса: с одной стороны – детерминированная модель, обусловленная низким уровнем автоматизации сбора и обработки данных [1, с. 58–62], а с другой стороны – транспортные системы, использующие цифровые интеллектуальные системы обработки и анализа данных (компьютерное зрение, системы поддержки и принятия решений) [2]. Всем этим системам присуща устаревшая модель организации транспортного планирования, основанная на использовании долгосрочных параметров, что приводит к разрыву между расчетными моделями и реальностью. Сегодня же нужны новые подходы в организации перевозок, обеспечивающие адаптивную реакцию транспортной системы в условиях стохастического транспортного процесса. В работе предложены:

- архитектура ИИСОП, отличающаяся от известных систем тем, что реализует полностью автоматическую функцию организации адаптивного транспортного процесса в реальном времени;
- математическое обеспечение ИИСОП, включающее критерии начала перевозочного процесса и комплекс интеллектуальных алгоритмов организации перевозки, формирующих в реальном времени варианты планов перевозки с учетом оптимизации ее ключевых параметров (при комбинированном использовании алгоритмы действуют синергетически, значительно повышая общую эффективность перевозок);
- система оценки эффективности перевозок как механизм отбора наилучшего плана на основе конкурентного выбора;
- программное обеспечение ИИСОП, принципиальное отличие которого от известных систем заключается в переходе от пассивного накопления исторических данных к автоматической организации перевозок в режиме реального времени путем оптимизации ключевых параметров транспортного процесса.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований, свидетельствующие об преимуществах организации перевозок посредством ИИСОП.

Анализ существующих решений. Для абсолютного большинства транспортных систем характерна устаревающая детерминированная организация транспортного процесса: управление осуществляется в рамках заданной структуры со слабой реакцией на стохастичность спроса на перевозку: маршрутная сеть, расписания, объем транспортного средства (ТС) определяется заранее на основе усредненных данных о транспортной потребности [3, с. 9]; планирование перевозок с помощью единого алгоритма (без сравнения сценариев и выбора лучшего из них); скоростные и экспрессные перевозки выполняются эпизодически (сезонно, праздники); учет проезда пассажиров без точного определения пункта назначения, что снижает возможность адекватного анализа перевозочного процесса.

ИИСОП как интеллектуальный уровень организации перевозок. Интеллектуальная система перевозок – транспортная система нового типа, поведение которой регулируется информационным процессом в реальном времени за счет циклического воспроизведения контура «сбор данных – их анализ – адаптивная реакция» [4, с. 46; 5]. Включает в себя:

- парк беспилотных транспортных средств малой вместимости (*инфобусов*). Инфобусы движутся по выделенной линии с максимальным приоритетом движения, развивая конструктивную скорость. Автоматическая система круиз-контроля инфобусов обеспечивает синхронное движение ТС по принципу автокаравана, образуя транспортное средство новой вместимости (называемое *кассетой*);
- фиксированный маршрут из k остановок в двух направлениях, на концах которого находятся накопители, где ТС осуществляют подзарядку и получают планы перевозки;
- единый центр организационно-управляющего воздействия – ИИСОП. При организации перевозок используются интеллектуальные алгоритмы (ИА), позволяющие адаптивно подбирать ключевые параметры перевозки (интервалы движения, объем ТС, посещаемые остановки).

ИСП реализует *комбинированный режим перевозки*, включающий выполнение перевозок в одном из режимов: *экспрессном* (посещаются только начальная и конечная остановки маршрута), *скоростном* (посещаются некоторые остановки маршрута), *обычном* (посещаются все остановки маршрута). *Комбинирование режимов перевозки позволяет сочетать преимущества скоростных перевозок (время поездки, экономия топлива) и обычной перевозки (гарантированное обслуживание всех остановок).*

Информационный контур транспортной системы представлен на рисунке 1. Его построение основано на следующих принципах. Информация о заявках на перевозку с остановочных терминалов постоянно поступает в систему сбора и хранения данных (ССХД, подсистема ИИСОП). Система организации перевозок (СОП, подсистема ИИСОП) каждые 5–10 с сканирует массив накопленных необслуженных заявок. При обнаружении достаточного их накопления запускается процесс определения плана перевозки: формируется матрица корреспонденций (МК), служащая информационной основой для всех используемых ИА. Используя МК, каждый ИА формирует план перевозки (ПП). Полученные ПП оцениваются целевой функцией (ЦФ), которая определяет оптимальный план перевозки (ОПП). ОПП рассылается в накопители инфобусам для реализации. После выполнения ОПП инфобусы отправляют отчеты в ИИСОП.

Таким образом, ИИСОП, в отличие от существующих решений, непрерывно реализует функцию полной автоматической адаптивной организации перевозок в условиях стохастического транспортного процесса через интеллектуальное планирование, конкурентный выбор оптимального плана перевозки и организацию в автоматическом режиме комбинированных перевозок.

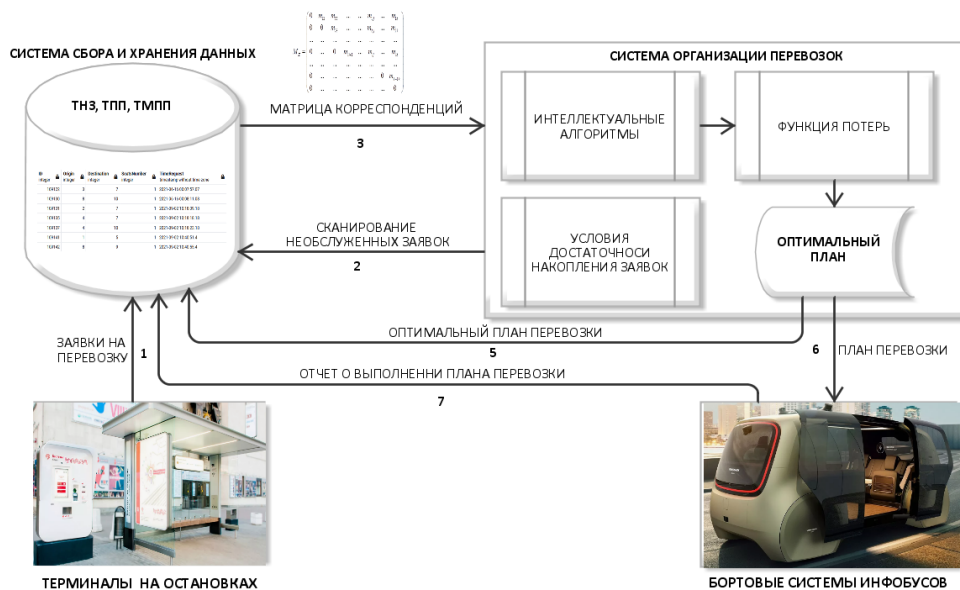


Рисунок 1. – Организация перевозок в ИСП: информационный контур ИСП

Математическое обеспечение ИИСОП (МО ИИСОП). МО ИИСОП представляет собой комплекс математических моделей, обеспечивающий теоретический базис для реализации автоматической функции адаптивной организации перевозки в условиях стохастического транспортного процесса. Включает в себя: матрицу корреспонденций [4, с. 45], критерии начала организации перевозок [4, с. 49], комплекс алгоритмов организации перевозок [4, с. 48], систему оценки эффективности перевозок [4, с. 74–79].

Матрица корреспонденций. Имеет размерность $k \times k$ (по числу остановок маршрута). В МК записывается информация о запрашиваемых пассажирами корреспонденциях. Каждый элемент МК $m_{ij}, i = \overline{1, k-1}, j = \overline{2, k}$ есть число необслуженных зафиксированных в ИСП на конкретный момент времени запросов от пассажиров на перевозку с остановки i на остановку j . На основе МК происходит построение планов перевозки.

Критерии начала перевозок. В отличие от существующих моделей организации перевозок, в которых перевозка начинается либо через определенный интервал времени, либо после накопления достаточного объема пассажиров/грузов для рентабельности рейса, критерии начала перевозок в ИИСОП используются для обеспечения проактивного поведения системы, подразамерающего начало организации перевозки до возникновения непосредственной необходимости в ней. Критерии начала перевозок представляют собой условия, накладываемые на элементы матрицы корреспонденций. Например:

$$m_{ij} \geq a \cdot V, \quad i = \overline{1, k-1}, \quad j = \overline{2, k}, \quad a \in [0, 5; 1), \quad (1)$$

где a – коэффициент эластичности (величина, используемая для обеспечения вывоза в том числе и пассажиров, пришедших на остановку i от момента начала перевозки инфобуса и до момента его прибытия на данную остановку, ее использование позволяет предусмотреть некоторый запас мест для таких пассажиров); V – объем инфобуса.

В соотношении (1) представлен критерий начала перевозки на основе критического элемента матрицы корреспонденций: перевозка начинается, как только некоторый элемент МК начинает удовлетворять условию (1). Наличие критического элемента указывает на накопившийся достаточный объем заявок по корреспонденции ij для скоростной перевозки. Если критических элементов несколько, то матрица обрабатывается для каждого из них в порядке убывания их значений.

Комплекс интеллектуальных алгоритмов организации перевозок. Обеспечивают формирование планов перевозки по матрице корреспонденций. При комбинированном использовании на основе конкурентного выбора алгоритмы действуют синергетически, повышая общую эффективность транспортного процесса.

Алгоритм организации перевозки на основе строки матрицы корреспонденций (ИА «По строке») [4, с. 53–60] представляет собой математическую модель нахождения ключевых параметров рейса для кассеты инфобусов, осуществляющей перевозку с некоторой остановки маршрута. Отличительными особенностями алгоритма являются динамическое определение числа инфобусов кассеты и формирование плана перевозки с конца маршрута к его началу (для того, чтобы инфобусы не задерживали друг друга). При разработке плана каждый инфобус получает собственный кластер соседних остановок, на которые будет осуществляться развозка. Для определения кластера остановок инфобуса n , входящего в осуществляющую развозку с остановки i кассету, находится упорядоченное (согласно следованию по маршруту) множество потенциальных остановок J_{i,n_p} (на которые он может перевезти пассажиров):

$$J_{i,n_p} = \{i+1, i+2, \dots, k\} \setminus J_{i,1} \setminus J_{i,2} \setminus \dots \setminus J_{i,n-1}, \quad (2)$$

где $J_{i,1}, \dots, J_{i,n-1}$ – реальные множества остановок инфобусов, уже определенных алгоритмом для кассеты.

Упорядоченное реальное множество остановок инфобуса $J_{i,n}$ определяется из соотношения (следование элементов в множестве согласно следованию остановок на маршруте)

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{i,n_p} = \{i+1, i+2, \dots, k\} \setminus J_{i,1} \setminus J_{i,2} \setminus \dots \setminus J_{i,n-1}; \\ \sum_{j=\sup J_{i,n_p}}^{\sup J_{i,n_p}} m_{ij} \leq V, \quad \sum_{j=\sup J_{i,n_p} - |J_{i,n}|}^{\sup J_{i,n_p}} m_{ij} > V; \\ J_{i,n} = \left\{ j \mid \sup J_{i,n_p} - |J_{i,n}| + 1 \leq j \leq \sup J_{i,n_p} \right\}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Таким образом, кластер остановок инфобуса формируется из элементов, последовательно отобранных от конца к началу упорядоченного множества потенциальных остановок J_{i,n_p} , для которых суммарное число пассажиров, едущих с остановки i , не превосходит объем инфобуса. Между остановками своего кластера инфобус может производить дополнительный подвоз пассажиров. После обработки i -й строки

матрицы корреспонденций определяется совокупность кластеров остановок доставки для кассеты, осуществляющей вывоз пассажиров с остановки i :

$$J_i = \bigcup J_{i,n}, n \in N, i = \overline{1, k-1}. \tag{4}$$

Итерационно используя данный алгоритм, можно обойти все строки матрицы, составив план перевозки, обеспечивающий вывоз всех пассажиров со всех остановок маршрута, заявки которых зафиксированы в матрице корреспонденций. В результате обработки матрицы алгоритм «простраивает» граф корреспонденций (рисунок 2).

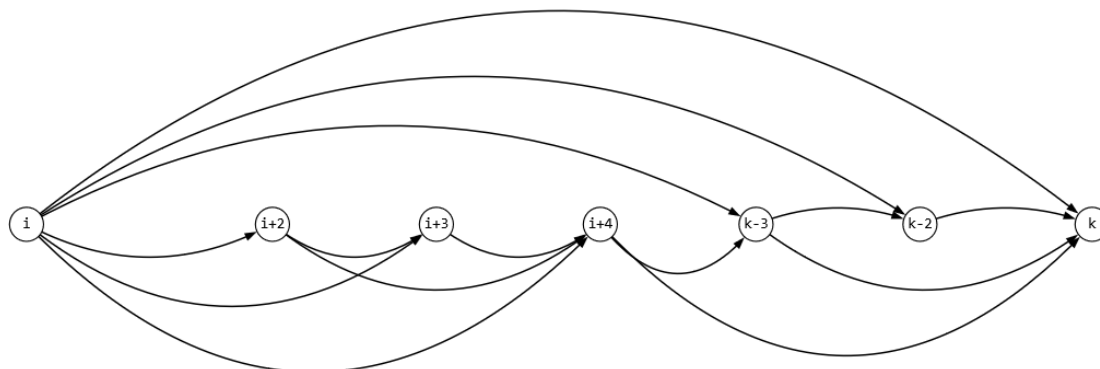


Рисунок 2. – Организация перевозок в ИСП: граф корреспонденций ИА «По строке»

Новизна организации перевозки по алгоритму «По строке»:

- ключевые параметры рейса определяются через серию итерационно-рекурсивных состояний (кластер остановок для текущего инфобуса зависит от сформированных кластеров остановок для предыдущих инфобусов на предыдущих итерациях);
- обработка маршрута (строка матрицы корреспонденций) от конца к началу для исключения задержек инфобусами друг друга;
- поиск реального множества остановок через максимальный элемент потенциального множества (определяется итерационно), а также через пассажироместимость транспортного средства;
- используется вычислительный метод с полиномиальной сложностью, позволяющий обрабатывать матрицы корреспонденций большого размера за миллисекунды.

Алгоритм организации перевозки на основе критического элемента матрицы корреспонденций (ИА «По критическому элементу») [4, с. 60–66; 6] представляет собой математическую модель нахождения ключевых параметров перевозки для обслуживания наиболее интенсивной корреспонденции МК. На данную корреспонденцию указывает элемент матрицы $m_{i^*j^*}$, удовлетворяющий условию

$$m_{i^*j^*} \geq a \times V, a \in [0,5; 1), \tag{5}$$

где V – объем транспортного средства;

a – коэффициент эластичности (величина, используемая для обеспечения вывоза в том числе и пассажиров, пришедших на остановку i^* от момента начала перевозки инфобуса и до момента его прибытия на данную остановку, ее использование позволяет предусмотреть некоторый запас мест для таких пассажиров).

В результате алгоритм формирует рейс, разделенный на три логические зоны (рисунок 3): подъезд к зоне основной перевозки (движение от начальной точки до остановки i^*), зона основной перевозки (экспрессное движение между остановками i^* и j^*), зона довоза до конечной точки маршрута (движение от j^* до конечной точки).

Первая и третья зоны организуются для исключения порожнего пробега ТС. Остановки подъезда к зоне основной перевозки определяются согласно системе требований

$$\begin{cases} \sum_{1 \leq i \leq i^* - 1, i \in N} m_{ii^*} \rightarrow \max; \\ \sum_{1 \leq i \leq i^* - 1, i \in N} m_{ii^*} \leq V. \end{cases} \tag{6}$$

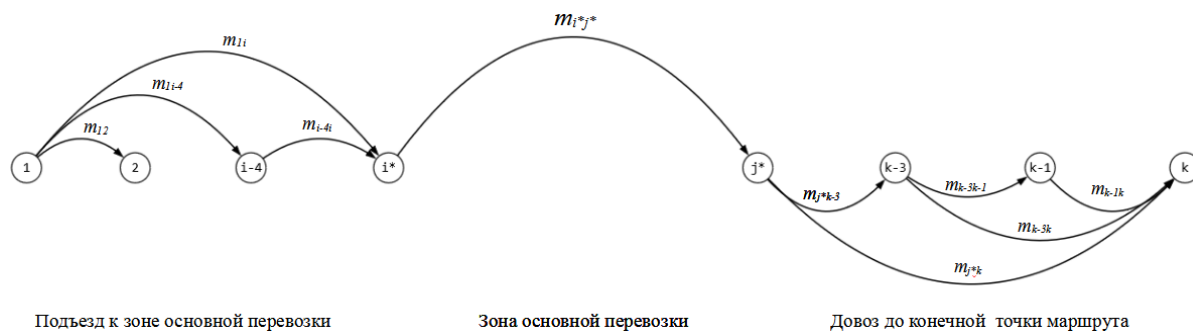


Рисунок 3. – Организация перевозок в ИСП: граф корреспонденций ИА «По критическому элементу»

Для оптимизации заполнения ТС между остановками этой зоны выполняется перевозка пассажиров. Выбор остановок осуществляется итерационно согласно системе требований (для текущей итерации)

$$\begin{cases} m_{ij} < V - \sum_{s \in S_{at}, s < j} m_{si^*} - \sum_{m_{sk} \in J_{pt}} m_{sk} + \sum_{\substack{m_{sk} \in J_{pt}, \\ s < i, k \leq i}} m_{sk}; \\ i, j \in S_{at}, i < j, \end{cases} \quad (7)$$

где V – объем инфобуса;

$\sum_{s \in S_{at}, s < j} m_{si^*}$ – пассажиры, следующие с предыдущих остановок на остановку i^* ;

$\sum_{m_{sk} \in J_{pt}} m_{sk}$ – пассажиры, которые перевозятся между посещаемыми остановками от первой до $(i^* - 1)$.

Рассчитывается на каждой итерации алгоритма отдельно;

$\sum_{m_{sk} \in J_{pt}, s < i, k \leq i} m_{sk}$ – объем освободившихся в салоне мест за счет вышедших пассажиров для данной

итерации.

Для составления плана перевозки для зоны довоза выбирается максимальный элемент m_{j^*j} , $j > j^*$ в строке j^* . Он включается первым в множество довоза. Остальные пассажиры зоны довоза до конечной остановки выбираются итерационно согласно системе требований

$$\begin{cases} m_{j^*j} + \sum_{j^* < s < j} m_{sj} \rightarrow \max; \\ m_{j^*j} + \sum_{j^* < s < j} m_{sj} \leq V; \\ s \in N, j < k. \end{cases} \quad (8)$$

Таким образом, зоны подъезда и довоза обрабатываются рекурсивно, а множество остановок формируется выборочно, что обеспечивает скоростной режим движения. В результате минимизируется как время поездки для пассажиров, так и механический износ транспортного средства. В зоне основной перевозки обеспечивается стабильно высокий коэффициент использования пассажироместности и минимальное время в пути за счет исключения промежуточных остановок, а также снижается эксплуатационный износ ТС благодаря сокращению циклов «разгон–торможение». Таким образом, организация перевозки позволяет совместить высокую скорость доставки на участке i^*j^* с общей эффективностью использования транспорта по всему маршруту, что выгодно отличает его от систем, работающих по принципу обязательного объезда.

Новизна организации перевозки на основе алгоритма «По критическому элементу»:

- множества остановок дополнительной перевозки определяются через серию итерационно-рекурсивных состояний;
- введение понятий дополнительного и попутного подвоза для оптимизации загрузки и пробега;
- перевозка в экспрессном режиме позволяет максимизировать заполняемость транспортного средства и минимизировать его износ из-за разгонов–торможений;
- используется вычислительный метод с полиномиальной сложностью, позволяющий обрабатывать матрицы корреспонденций большого размера за миллисекунды.

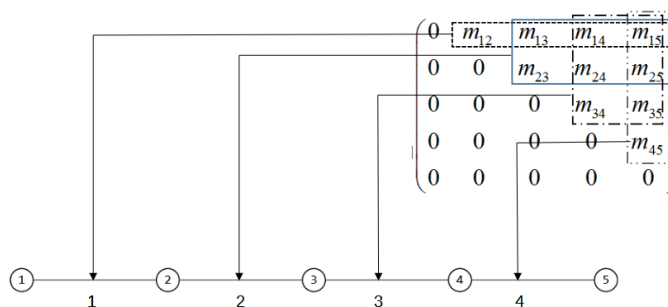
Алгоритм организации перевозки по наиболее пассажиронапряженному перегону (ИА «По наиболее пассажиронапряженному перегону»). Ключевые параметры перевозки при традиционном подходе рассчитываются исходя из величины наиболее пассажиронапряженного перегона (участка маршрута между двумя соседними остановками с наибольшей загруженностью ТС), которая определяется раз в полгода – несколько лет, что часто приводит к неспособности системы адекватно реагировать на изменения спроса на перевозку. ИА «По наиболее пассажиронапряженному перегону» [4, с. 66–68] представляет собой математическую модель организации перевозки, усовершенствующую классический подход. Ее суть заключается в динамическом расчете объема кассеты (ТС) по наиболее пассажиронапряженному перегону в реальном времени.

Алгоритм находит пассажиронапряженность на каждом перегоне $n, n = \overline{1, k-1}$ по МК (рисунок 4) согласно формуле (9):

$$p_n = \sum_{i=1}^n \sum_{j=n+1}^k m_{ij}, n = \overline{1, k-1}. \tag{9}$$

Среди полученных значений определяется наиболее пассажиронапряженный перегон: $\max\{p_n\}, n = \overline{1, k-1}$ и число инфобусов: $\lceil \max\{p_n\} : V \rceil, n = \overline{1, k-1}$. Такой способ организации перевозки позволяет на каждый рейс формировать и высылать кассету минимально необходимого объема, что сокращает потери транспортного предприятия от неэффективного использования пассажироместимости.

Рисунок 4. – Организация перевозок в ИСП: определение пассажиронапряженности перегонов



Новизна организации перевозки согласно методике алгоритма «По наиболее пассажиронапряженному перегону»:

- динамическое определение пассажироместимости ТС в реальном времени;
- использование МК, сформированной в реальном времени, для определения пассажиронапряженности на каждом перегоне.

Таким образом, алгоритм обеспечивает гибкую адаптацию работы транспорта к изменяющемуся спросу, в отличие от традиционных статических моделей организации перевозок.

Подход позволяет точно определить наиболее загруженный участок маршрута и оптимально распределить транспортные ресурсы, формируя кассету инфобусов минимально необходимого объема. Это снижает издержки от неэффективного использования пассажироместимости.

Система оценки эффективности перевозок и баланса интересов транспортного предприятия и пассажиров. Важным аспектом поведения ИИСОП является адаптивный выбор в реальном времени оптимального плана перевозки. Выбор осуществляется с помощью ЦФ (функции потерь перевозки), которая представляет линейную комбинацию оценок потерь перевозки. Коэффициенты линейной комбинации – экспертные веса, регулирующие влияние конкретного вида потерь на оценку эффективности перевозки (10). Предложенная модель, используя экспертные веса, позволяет гибко настраивать систему приоритетов перевозки:

$$P(K_{НВ}, K_{РТ}, K_{ПО}, K_{ПП}) = \alpha K_{НВ} + \beta K_{РТ} + \gamma K_{ПО} + \phi K_{ПП} \rightarrow \min, \tag{10}$$

- где $K_{НВ}$ – коэффициент неиспользованной пассажироместимости ТС;
 $K_{РТ}$ – коэффициент разгонов–торможений;
 $K_{ПО}$ – коэффициент ожидания пассажиров;
 $K_{ПП}$ – коэффициент продолжительности поездки.

$$K_{НВ} = 1 - \left(\sum_{i=1}^{k-1} q_i l_i \right) : \left(\sum_{i=1}^{k-1} V l_i \right) = 1 - \left(\sum_{i=1}^{k-1} q_i l_i \right) : VL, \tag{11}$$

- где q_i – число пассажиров на перегоне следования i ;
 l_i – длина перегона i ;

V – объем транспортного средства;

L – длина маршрута.

Чем ниже значение коэффициента, тем эффективнее использовалась пассажировместимость транспортного средства во время рейса и тем ниже потери перевозчика, понесенные при перевозке.

$$K_{PT} = |J_n| : k, \quad (12)$$

где k – число остановок маршрута;

$|J_n|$ – мощность множества остановок, сделанных транспортным средством, при реализации плана перевозки.

Чем меньше разгонов–торможений во время рейса, тем меньше износ ТС. Таким образом, минимизация значения коэффициента K_{PT} повышает эффективность перевозки.

$$K_{ПО} = \left(\sum_{i=1}^{q_{\text{пасс}}} (T_{\text{ВО}_i} / q_{\text{пасс}}) \right) : T_{\text{НВО}}, \quad (13)$$

где $q_{\text{пасс}}$ – число всех пассажиров, перевезенных за рейс;

$T_{\text{ВО}_i}$ – время ожидания транспортного средства i -м пассажиром по всем пассажирам рейса;

$T_{\text{НВО}}$ – нормативное время ожидания (10–20 мин).

Чем ниже среднее время ожидания транспортного средства при перевозке, тем ниже значение $K_{ПО}$ и тем выше уровень пассажирского комфорта и меньше потери, которые несут пассажиры при перевозке. Таким образом, минимизация коэффициента $K_{ПО}$ приводит к минимизации потерь пассажиров при перевозке.

$$K_{ПП} = \left(\sum_{i=1}^{q_{\text{пасс}}} (T_{\text{ВПИ}_i} / T_{\text{ВПИ}_i^*}) \right) : q_{\text{пасс}}, \quad (14)$$

где $q_{\text{пасс}}$ – число всех пассажиров, перевезенных за рейс;

$T_{\text{ВПИ}_i}$ – время поездки i -го пассажира при реализации плана перевозки (при этом транспортное средство может останавливаться не на всех остановках);

$T_{\text{ВПИ}_i^*}$ – время поездки i -го пассажира при перевозке в обычном режиме в «традиционной» транспортной системе.

Чем меньше время, фактически потраченное пассажиром на поездку, тем меньше временные потери пассажира при перевозке, тем выше уровень комфорта пассажира. Как и в предыдущем случае, минимизация коэффициента влечет минимизацию потерь пассажиров от перевозки.

Особенностью оценки эффективности перевозки в ИСП является ее двухкомпонентность: перевозка оценивается с позиции интересов транспортного предприятия и пассажира. Причем их интересы противоположны. Так, увеличение времени ожидания пассажиром транспорта ведет к увеличению наполняемости транспортного средства и наоборот. К задаче эффективной организации транспортного процесса относится обеспечение баланса между этими частями системы, чтобы интересы каждой компоненты были максимально учтены.

Оценка эффективности перевозки и баланса интересов строится на векторной модели (рисунок 5), где \vec{P}_A – вектор потерь транспортного предприятия, координаты которого определяются как

$$\vec{P}_A = (\vec{0}; K_{\text{НВ}} + K_{\text{PT}}). \quad (15)$$

\vec{P}_P – вектор потерь транспортного предприятия, координаты которого определяются как

$$\vec{P}_P = (K_{\text{ПО}} + K_{\text{ПП}}; \vec{0}). \quad (16)$$

\vec{P} – радиус-вектор общих потерь перевозки, определяется как сумма вектора потерь транспортного предприятия и вектора потерь пассажиров:

$$\vec{P} = \vec{P}_A + \vec{P}_P; \quad (17)$$

$$|\vec{P}| = \sqrt{|\vec{P}_A|^2 + |\vec{P}_P|^2}. \quad (18)$$

Под линией баланса интересов (рисунок 5), понимается прямая, являющаяся геометрическим местом концов радиус-векторов общих потерь перевозки, для которых соблюден баланс между интересами перевозчика и пассажиров. Предлагается описывать линию баланса уравнением $y = kx, k \in [0; +\infty)$, где k – коэффициент экспертной оценки. В качестве базиса для последующей калибровки взято значение k , равное 1. Таким образом, системой критериев «идеальной перевозки» можно считать соотношение (18):

$$\begin{cases} |\vec{P}| = \sqrt{|\vec{P}_A|^2 + |\vec{P}_P|^2} \rightarrow \min; \\ \alpha = \arctan\left(\frac{|\vec{P}_A|}{|\vec{P}_P|}\right) \rightarrow \frac{\pi}{4}. \end{cases} \quad (19)$$

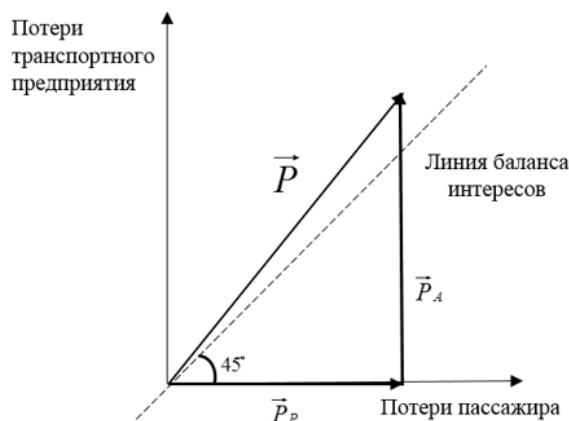


Рисунок 5. – Организация перевозок в ИСП: векторная модель оценки эффективности перевозки

Научная новизна предложенной модели оценки эффективности перевозки заключается:

- в разработке целевой функции, интегрирующей разнородные показатели потерь и позволяющей оценивать перевозку с учетом интересов как транспортного предприятия, так и пассажиров. Экспертные коэффициенты целевой функции позволяют гибко настраивать приоритеты при выборе оптимального плана перевозки;

- в разработке векторной модели оценки эффективности перевозки, позволяющей проводить анализ и характер перевозок посредством визуализации их эффективности.

Такой подход в оценке перевозок позволяет перейти от эмпирического управления к математически обоснованному и сбалансированному принятию решений в интеллектуальных транспортных системах.

Программное обеспечение ИИСОП (ПО ИИСОП). ПО ИИСОП реализует функционал, построенный на базе МО ИИСОП, обеспечивающий сбор, хранение и аналитическую обработку данных с целью осуществления адаптивной организации перевозок [5]. Представляет две взаимодействующие подсистемы: ССХД и СОП. ССХД обеспечивает сбор и хранение данных. Работа СОП циклична. Циклы работы системы запускаются с интервалом 5–30 с и состоят из последовательного выполнения трех процедур: процедуры проверки достаточности накопления заявок, процедуры нахождения ОПП и процедуры записи и пересылки ПП (рисунок 6). Завершение выполнения циклов происходит вместе с завершением работы ИИСОП в целом.

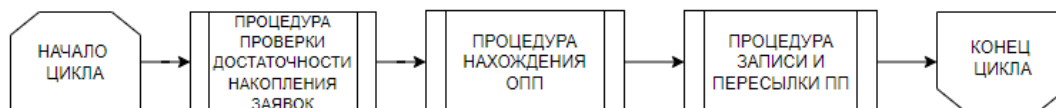


Рисунок 6. – Организация перевозок в ИСП: цикл работы СОП

Отличительной особенностью ПО ИИСОП является возможность автоматически реализовывать в фоновом режиме функционал:

- циклического сканирования массива необработанных заявок (на предмет выполнения критериев начала перевозки), обеспечивая тем самым проактивное (упреждающее) поведение системы;
- формирования в реальном времени на основе массива необработанных заявок матрицы корреспонденций, позволяя получать актуальную информацию о спросе на корреспонденции;

- переноса после определения рабочего ПП обработанных заявок в архив, что обеспечивает присутствие в МК только необработанных заявок;
- конкурентного выбора ОПП, оценку его эффективности и баланса интересов.

ПО ИИСОП позволяет добавлять новые алгоритмы, критерии начала перевозки и оценки эффективности, расширяя тем самым аналитические возможности ИИСОП. Среднее время нахождения оптимального плана перевозки ПО ИИСОП составляет 30 мс.

Результаты исследования эффективности организации перевозок посредством ИИСОП. Целью проведенных исследований работы ИИСОП является оценка эффективности пассажирских перевозок, организуемых ею (экспериментальные данные), в сравнении с перевозками, организованными «традиционным» способом (эталонные данные).

Скоростные и экспрессные перевозки оправданы на высокопоточных маршрутах, так как позволяют одновременно перевозить большой объем пассажиров, снижая затраты перевозчика и временные потери пассажиров. Исходя из этих соображений для исследований была смоделирована организация перевозок с помощью ИИИСОП на Московской линии метрополитена г. Минска. Моделирование пассажиропотока было выполнено с помощью специально разработанной системы имитации спроса на перевозку (СИСП) [4, с. 86–97]. СИСП в реальном времени генерировала заявки на перевозку и пересылала их в ИИСОП (ССХД). СОП с заданным интервалом в реальном времени анализировала накопленные заявки и при достаточном их количестве формировала экспериментальные данные: планы перевозок и оценки их эффективности, записывая их в ССХД. Для обеспечения сопоставимости результатов исследования эталонные данные (перевозка метро, организованная традиционным образом) были получены путем обработки того же набора заявок на перевозку (хранящиеся в ССХД), на котором строятся экспериментальные данные. Анализ экспериментальных и эталонных данных производился с помощью платформы R (рисунок 7).

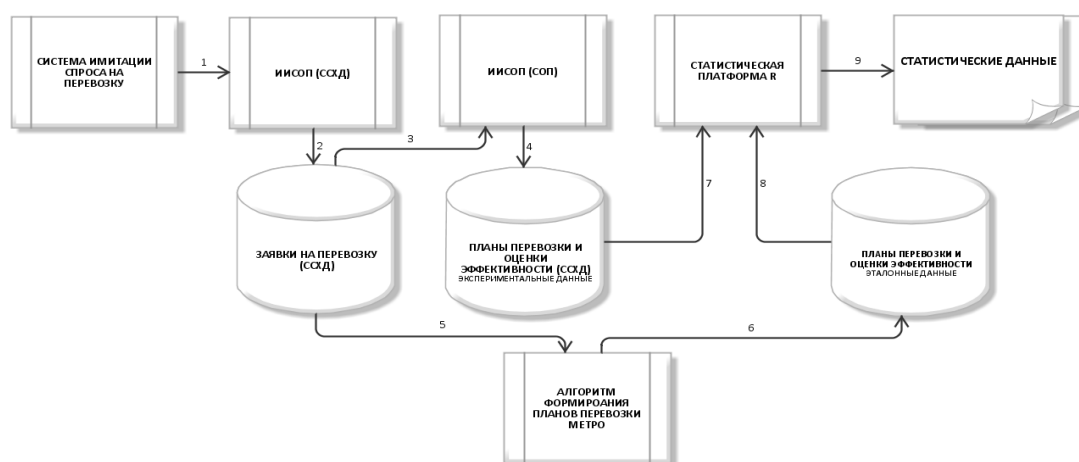


Рисунок 7. – Получение статистических данных исследования

В таблице приведены сводные статистические результаты сравнения медиан экспериментальных и эталонных данных. Сравнение выполнено через относительное отклонение (столбец 3) по каждой оценке эффективности перевозки и модулю вектора потерь перевозки. Медиана была выбрана в качестве показателя в силу своей робастности, то есть большей устойчивости к выбросам по сравнению со средним значением.

Таблица. – Сводные статистические результаты

Алгоритм	$K_{ИВ}$			$K_{РТ}$			$K_{ПО}$			$K_{ПП}$			$ \bar{P} $		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0,433	0,334	+30 %	0,449	1	-55%	0,307	0,473	-35%	0,53	1	-47 %	1,324	2,221	-40 %
2	0,714	0,334	+114 %	0,357	1	-64%	0,574	0,473	+21%	0,514	1	-49 %	1,266	2,221	-43 %
3	0,501	0,334	+50%	1	1	0%	0,613	0,473	+29%	1	1	0 %	2,221	2,221	0 %
4	0,461	0,334	+38 %	0,571	1	-43 %	0,525	0,473	+11%	0,559	1	-44 %	1,446	2,221	-35 %
Строки (алгоритмы): 1 – «По строке»; 2 – «По критическому элементу»; 3 – «По наиболее пассажиронапряженному перегону»; 4 – Комбинированная перевозка							Группа столбцов по каждой оценке эффективности: 1 – экспериментальные данные; 2 – эталонные данные (метро); 3 – относительное отклонение экспериментальных данных от эталонных								

Медианные значения $K_{ив}$ по эталонным и экспериментальным данным продемонстрировали более эффективное использование пассажироместности транспортного средства по сравнению с перевозкой метро: для комбинированной перевозки на 38 %; для алгоритма «По строке» на 30 %; для алгоритма «По критическому элементу» на 114 %; для алгоритма «По наиболее пассажиронапряженному перегону» на 50 %.

Медианные значения $K_{рт}$ по эталонным и экспериментальным данным продемонстрировали снижение потерь от разгонов–торможений во время рейса по сравнению с перевозкой метро: для комбинированной перевозки на 43 %; для алгоритма «По строке» на 55 %; для алгоритма «По критическому элементу» на 64 %; для алгоритма «По наиболее пассажиронапряженному перегону» данный вид потерь равнялся потерям при перевозке метро, так как во время рейса посещались все остановки маршрута.

Среди всех показателей потерь лишь показатели $K_{по}$ по эталонным и экспериментальным данным продемонстрировали превышение потерь ожидания пассажиров во время рейса по сравнению с перевозкой метро: для комбинированной перевозки на 11 %; для алгоритма «По критическому элементу» на 21 %; для алгоритма «По наиболее пассажиронапряженному перегону» на 29 %. И только для алгоритма «По строке» потери ожидания ТС были ниже эталонных, причем на 35 %.

Медианные значения $K_{пп}$ по эталонным и экспериментальным данным продемонстрировали снижение потерь продолжительности поездки по сравнению с перевозкой метро: для комбинированной перевозки на 44 %; для алгоритма «По строке» на 47 %; для алгоритма «По критическому элементу» на 49 %; для алгоритма «По наиболее пассажиронапряженному перегону» данный вид потерь равнялся потерям при перевозке метро, так как во время рейса ТС и при той, и при другой перевозке посещались все остановки.

Медианные значения модуля вектора потерь продемонстрировали снижение совокупных потерь перевозки по сравнению с перевозкой метро: для комбинированной перевозки на 35 %; для перевозки, организованной по алгоритму «По строке» на 40 %; по алгоритму «По критическому элементу» на 43 %. Оба варианта перевозки – «По наиболее пассажиронапряженному перегону» и метро – в обычном режиме показали примерно равные медианные значения общих потерь.

Заключение. Предложена архитектура ИИСОП, отличающаяся от известных аналогов полной автоматической организацией адаптивных перевозок за счет автономного интеллектуального планирования, конкурентного выбора оптимального плана перевозки, организации комбинированного транспортного процесса. Имитационные испытания показали, что комбинированный транспортный процесс, сочетающий скоростные, экспрессные и обычные перевозки, позволяет существенно улучшить следующие параметры: полезное использование объема ТС выросло на 38 %, число разгонов–торможений снизилось на 43 % (что уменьшает износ), а время в пути сократилось на 44 %.

Предложено математическое обеспечение ИИСОП, обладающее следующими элементами новизны:

1) критерии начала организации перевозочного процесса, реализующие проактивный (упреждающий) компонент в поведении ИСП и тем самым отличающие ее от известных транспортных систем, которые работают по жесткому расписанию;

2) математические модели интеллектуальных алгоритмов организации перевозки, формирующие в реальном времени через серию итерационно–рекурсивных состояний планы перевозки с учетом оптимизации таких параметров, как объем транспортного средства, посещаемые остановки:

– интеллектуальный алгоритм «По строке» позволяет по сравнению с перевозкой, организованной традиционным способом, увеличить эффективность использования пассажироместности ТС на 30 %, снизить число разгонов–торможений на 55 %, время ожидания пассажиров на 35 %, время в пути на 47 %, общие потери перевозки на 40 %;

– интеллектуальный алгоритм «По критическому элементу» позволяет по сравнению с перевозкой, организованной традиционным способом, увеличить эффективность использования пассажироместности ТС на 114 %, снизить число разгонов–торможений на 64 %, время в пути на 49 %, общие потери перевозки на 43 %;

– интеллектуальный алгоритм «По наиболее пассажиронапряженному перегону» позволяет по сравнению с перевозкой, организованной традиционным способом, увеличить эффективность использования пассажироместности ТС на 50 %;

– комбинированная перевозка, базирующаяся на сочетании интеллектуальных алгоритмов, позволяет по сравнению с перевозкой, организованной традиционным способом, увеличить эффективность использования пассажироместности ТС на 38 %, снизить число разгонов–торможений на 43 %, время в пути – на 44 %, общие потери перевозки – на 35 %;

3) математическая модель системы оценки эффективности перевозок, включающая в себя:

– целевую функцию потерь, учитывающую показатели потерь перевозчика и пассажиров и реализующую механизм определения оптимального плана перевозки в реальном времени за значительно меньшее вычислительное время (среднее время поиска 30 мс), чем в известных аналогах;

– возможность сравнения перевозок разных рейсов через абсолютную величину общих потерь, что позволяет выполнять анализ транспортного процесса на макроуровне.

Предложено программное обеспечение ИИСОП, базирующееся на разработанном математическом обеспечении и отличающееся от аналогов автоматической реализацией контура «мониторинг – анализ – адаптивная реакция», которая обеспечивает адаптивное реагирование системы на стохастический спрос на перевозку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенгбуш М. В., Белинский А. Ю., Дынкин А. Г. Пассажиропотоки в городах. – М.: Транспорт, 1974. – 136 с.
2. Hoang T., Di Paola D., Ohazulike A. Distributed Vision-Based Passenger Flow Monitoring System for Light Rail Networks // *Advances in Intelligent Traffic and Transportation Systems*. – 2023. – DOI: [10.3233/ATDE230009](https://doi.org/10.3233/ATDE230009).
3. Антошвили М. Е., Либерман С. Ю., Спирин И. В. Оптимизация городских автобусных перевозок. – М.: Транспорт, 1985. – 102 с.
4. Шуть В. Н., Швецова Е. В. Кассетно-конвейерная технология скоростных систем городских пассажирских перевозок = Cassette-Conveyor Technology of High-Speed Systems of City Passenger Transportation: монография. – Брест: БрГТУ, 2023. – 207 с.
5. Management Principles in Intelligent Passenger Transportation System / Shviatsova A., Wang H., Shuts V. et al. // *2024 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*. – IEEE, 2024. – С. 1–6. – DOI: [10.1109/TIRVED63561.2024.10769907](https://doi.org/10.1109/TIRVED63561.2024.10769907).
6. Швецова Е. В., Шуть В. Н. Алгоритм организации перевозок на основе критического элемента матрицы корреспонденций // *Транспорт Урала*. – 2023. – № 2 (77). – С. 34–40. – DOI: [10.20291/1815-9400-2023-2-34-40](https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-2-34-40).

Поступила 21.11.2025

INTELLIGENT INFORMATION SYSTEM FOR ORGANIZING TRANSPORTATION

A. SHVIATSOVA, V. SHUTS
(*Brest State Technical University*)

An intelligent information transportation management system (IITMS) is considered, which implements a new approach to the organization of the transport process, consisting in continuous automatic reproduction of the cycle «monitoring demand for transportation – data analysis – adaptive response of the transport system». The concept of an intelligent high-speed transportation system (IHSTS) is proposed as an IITMS management object. The basic principles of the IHSTS operation are considered. The mathematical support of the IITMS is considered through mathematical models of intelligent transportation management algorithms, trigger conditions for launching transportation, and a transportation efficiency assessment system that allows real-time search for the optimal transportation plan based on a competitive choice among the proposed transportation plans. The IITMS software is considered, the functionality of which is based on mathematical software. Experimental test results are presented, indicating the advantages of organizing transportation via IITMS.

Keywords: *Intelligent transportation management information system, intelligent transportation management algorithms, intelligent transportation systems, correspondence matrix, combined transportation, intelligent transportation management, infobus.*