

На правах рукописи

Ли Сяокунь

Ли Сяокунь

Совершенствование методов управления скоростным автобусным транспортом (на примере Китайской Народной Республики)

Специальность 2.9.8. – Интеллектуальные транспортные системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону –2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет».

Научный руководитель - **Зырянов Владимир Васильевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Жанказиев Султан Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Организация и
безопасность движения, интеллектуальные
транспортные системы» ФГБОУ ВО
«Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет
(МАДИ)»

Кулев Андрей Владимирович
кандидат технических наук, доцент кафедры
сервиса и ремонта машин ФГБОУ ВО
«Орловский государственный университет
имени И.С. Тургенева»

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Белгородский
государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова»

Защита диссертации состоится «18» декабря 2024 г. в 14:00 час. на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.138.02 на базе ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» по адресу: 302030, г. Орел, ул. Московская, д. 77, ауд. 426.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и в фундаментальной библиотеке по адресу: 302028, г. Орел, пл. Каменская, д. 1.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г. Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и на официальном сайте Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (www.vak.minobrnauki.gov.ru).

*Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, в двух экземплярах направлять в диссертационный совет 99.2.138.02 по адресу:
302030, г. Орел, ул. Московская, д. 77, тел.: + 79208120727,
e-mail: maxim.ka@mail.ru*

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Кулев М.В.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

Повышение привлекательности общественного транспорта достигается многими методами, одним из которых являются различные виды предоставления приоритета транспортным средствам наземного транспорта. В этом отношении выделяется система скоростного автобусного транспорта (Bus Rapid Transit, BRT), базирующаяся на технологиях интеллектуальных транспортных систем, обеспечивающая быстрое и экономичное обслуживание пассажиров в сочетании с высокой провозной способностью. BRT предполагает использование функций интеллектуальной транспортной системы в части планирования и диспетчеризации, управления движением, информирования пассажиров.

Реализация проектов BRT имеет большое значение для улучшения городской транспортной среды. В условиях роста заторов на городских улицах внедрение BRT может кардинально улучшить качество транспортного обслуживания. Благодаря своим преимуществам с точки зрения стоимости, гибкости и эффективности услуг общественного транспорта, BRT является эффективным средством решения проблемы городских заторов и повышения удобства передвижения для жителей. Реализация проектов BRT может эффективно интегрировать и упорядочить обычные автобусные маршруты и снизить транспортную нагрузку на основные автобусные коридоры. Современный статус внедрения BRT демонстрирует быстрое развитие и широкий охват.

В КНР, по мере роста городского населения, нагрузка на обычные наземные автобусы продолжает расти. Поэтому развитию BRT в Китае придается важнейшее значение. В 2004 году в Китае приняты рекомендации считать BRT приоритетным направлением развития городского пассажирского транспорта как практичную и доступную стратегию решения проблемы заторов. 13-й пятилетний план национального экономического и социального развития (2016-20), поставил задачи развивать и диверсифицировать системы BRT включая интеллектуальные системы управления. Если по состоянию на 2015 год в Китае эксплуатировалось 2 991 км BRT, то в настоящее время протяженность сети BRT превышает 7 тыс. км.

Несмотря на достаточно успешные примеры реализации проектов BRT существуют и определенные проблемы как научного, так и прикладного характера. Для обеспечения работы систем BRT необходима эффективная система управления и планирования, обеспечивающая точное выполнение расписания движения и интеграцию с обычными автобусными маршрутами. Это является актуальной задачей поскольку в Китае только в 7 городах в час пик эксплуатационная скорость BRT превышает 20 км/час. Управление

безопасностью систем BRT также является важным вопросом для обеспечения безопасности пассажиров и качества обслуживания.

Степень изученности проблемы.

Исследованиям по повышению эффективности и качества транспортного обслуживания населения с использованием возможностей интеллектуальных транспортных систем уделяется значительное влияние. С точки зрения совершенствования применения ИТС и организации дорожного движения можно выделить вклад таких ученых, как В.М. Власов, С.А. Евтюков, С.В. Жанказиев, В.В. Зырянов, Г. И. Клинковштейн, В.И. Коноплянко, В.Э. Клявин, А.Н. Новиков, И.А. Новиков, В.В.Сильянов, Сарбаев В.И., А.Г. Шевцова. Управленческие и технологические проблемы обеспечения приоритета общественного транспорта отражены в работах А.Э. Горева, В.А. Гудкова, В.В. Донченко, С.В. Еремина, В.М. Курганова, Л.Б. Миротина, Ю.В. Трофименко, Л.С. Трофимовой. Китайская научная школа в этом направлении представлена научными исследованиями Чжу Цзиньшоу, Ян Юнган, Чжан Хунцзюнь, Дэн Джулун, Гуан Сяопин, Лю Анье, Сюй Чжаою, Чэнь Чжуан. Труды этих и других ученых использованы автором в диссертационной работе.

Анализ данной проблемы с системной точки зрения позволил выявить недостаточный уровень знаний и определенных противоречий в исследуемой области. Это касается совершенствования методов и моделей оценки качества транспортного обслуживания BRT, развития интеграционной платформы интеллектуальной системы управления BRT, моделей оптимизации интервалов движения транспортных средств BRT.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности скоростного автобусного транспорта на основе интеллектуальных транспортных систем.

Задачи исследования.

1. Анализ опыта внедрения BRT и выявление проблем, которые создают барьеры на пути организации эффективного функционирования этого метода приоритетного движения общественного транспорта.

2. Проведение исследований по сбору данных и экспериментальной обработке с помощью интеллектуальной платформы обмена информацией об автобусах BRT.

3. Разработка моделей оценки качества работы BRT на серого регрессионного и кластерного анализа.

4. Разработка математической модели оптимизации интервалов движения BRT на основе использования генетического алгоритма с возможностью применения в реальном режиме времени

Объект исследования: городской пассажирский автобусный транспорт.

Предмет исследования: интеллектуальные системы скоростного автобусного транспорта.

Рабочая гипотеза заключается в предположении, что применение

разработанных методики и моделей позволит обеспечить повышение качества работы скоростного автобусного транспорта.

Научная новизна работы

1. Получены новые теоретико-методические решения системной задачи развития скоростного автобусного транспорта (BRT) включая совершенствование архитектуры интеллектуальной платформы BRT, методы и модели оценки качества функционирования BRT, модели оперативного управления подвижным составом BRT.

2. Впервые для подобных задач применены модели серого регрессионного и кластерного анализа для оценки качества функционирования BRT.

3. Разработана новая модель оценки качества услуг общественного транспорта, которая отличается от существующих моделей тем, что позволяет комплексно сравнивать множество независимых показателей, группировать и анализировать их без ограничения объема собранных данных, а также обеспечивает объективное сравнение качества услуг BRT.

4. Разработана математическая модель для оптимизации интервалов движения BRT на основе использования генетического алгоритма. Целевая функция модели представляет собой сумму общей стоимости пассажирских поездок и эксплуатационных расходов BRT.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методики создания интеллектуальной платформы обмена информацией о BRT, математической модели для оценки качества услуг общественного транспорта и оптимизации интервалов движения BRT, а также методики автономной оптимизации интервалов отправления в зависимости от спроса пассажиров и эксплуатационных расходов BRT.

Практическое значение работы заключается в формировании методики для систем принятия решений по управлению BRT. Полученные результаты носят прикладной характер и могут быть использованы для решения практических задач. Результаты исследования использованы в практическом управлении по организации дорожного движения отрядом дорожной полиции Бюро общественной безопасности города Хэцзе (КНР).

Методы исследования. Диссертационная работа выполнена на основе проведенных научных исследований, трудов ведущих ученых в области интеллектуальных транспортных систем, организации дорожного движения и перевозок. В диссертационной работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследований, включающие системный анализ, математическую статистику, методы моделирования. Фактические данные получены в ходе экспериментальных исследований, статистического анализа данных Национального бюро статистики КНР, Министерства транспорта КНР.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структура и функции новой интеграционной платформы

интеллектуальной системы BRT.

2. Метод анализа и оценки качества функционирования BRT на основе моделей серого кластерного анализа.

3. Модель оптимизации расписания на основе генетического алгоритма с использованием целевой функции модели включающей сумму общей стоимости пассажирских поездок и эксплуатационных расходов BRT.

4. Система принятия управленческих решений на основе качества обслуживания BRT и эксплуатационных расходов автобусов для использования такими организациями, как автобусные компании и транспортные департаменты.

Степень достоверности и апробация результатов: Достоверность результатов. Достоверность результатов исследования была подтверждена теоретически - путем обоснования целей и задач исследования; и экспериментально - на основе использования генетического алгоритма (GA Genetic Algorithm) для расчета общей стоимости поездки пассажира на BRT. Моделирование проводилось путем объединения интеллектуальных систем с системами BRT, и публикации автора в ВАК, рецензируемых изданиях Scopus/Web of Science.

Апробация работы:

Обоснованность и достоверность выносимых на защиту научных результатов обеспечиваются применением методики исследования на основе современных математических методов, апробацией результатов исследования на международных конференциях.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-практических конференциях: IX международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инноваций на транспорте» (Орел, 2023 г.), IV международной конференции «Устойчивое и инновационное развитие в цифровом глобальном пространстве» (Ростов-на-дону, 2024 г.), X международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инноваций на транспорте» (Орел, 2024 г.).

Личный вклад автора. Все основные результаты исследования и варианты определения оптимизации дорожного движения получены автором самостоятельно.

Информационная база исследования: Нормативные и методические материалы. Китайские и региональные целевые программы развития систем городского общественного транспорта, материалы. Целевые программы, материалы по городским системам скоростного автобусного транспорта. Министерство транспорта Китая и региональные органы власти, департаменты и агентства, статистические данные.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности: Выполненные исследования отвечают формуле паспорта научной специальности 2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы: Пункт 10.

Теоретические основы и прикладные методы анализа и повышения эффективности, надежности и безопасности функционирования интеллектуальных транспортных систем, их отдельных элементов на всех этапах жизненного цикла.

Публикации: Основные положения диссертации опубликованы в 6 статьях, в том числе 3 в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Структура и объем работы: Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 131 наименований. Текст диссертации изложен на 189 страницах, включает 35 таблиц, 41 рисунок.

2.ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Анализ развития систем организации приоритетного движения общественного транспорте» выполнен анализ организации приоритета движения транспорта в различных странах, анализ развития систем BRT, развития BRT в КНР, проблем организации BRT. На рис.1, 2 представлена динамика развития BRT в Китае, включая длину маршрутной сети и количество транспортных средств, задействованных в системе BRT.



Рис. 1 – BRT в Китае (совокупность транспортных средств)

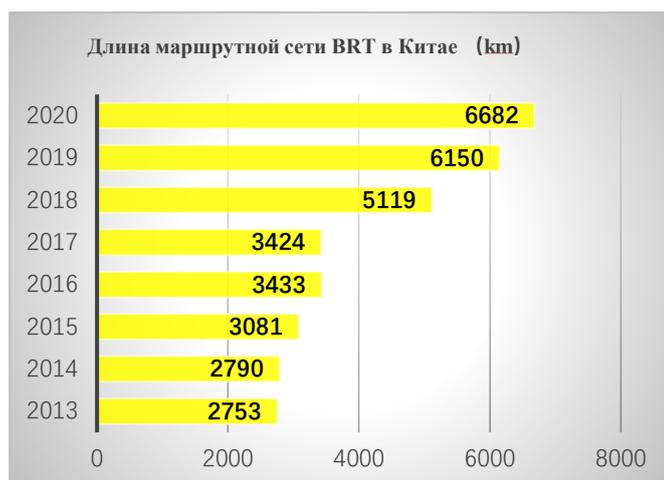


Рис. 2 – Длина маршрутной сети BRT в Китае (км)

Анализ показывает, что Интеллектуальная система BRT должна достигать следующих целей:

- Соответствовать современным требованиям управления «бизнес данные - эксплуатационные данные - информационные данные», необходимые для работы системы BRT, и достигать оперативных целей эффективной работы, высококачественного обслуживания и высоких стандартов управления;
- Динамическое позиционирование транспортных средств BRT в режиме реального времени с помощью навигационных систем и видеонаблюдения в реальном времени за транспортными средствами и остановочными пунктами, чтобы обеспечить объективную основу для оптимизации расписания в реальном времени;
- Использование транспортной информационной системы для оптимизации плана операций и плана работы водителей в то же время объединяя соответствующие данные, полученные в результате динамического мониторинга, сбора в реальном времени и обратной связи с персоналом, и реализация планирования в реальном времени.
- В соответствии с операционными характеристиками BRT реализовать автоматическую идентификацию транспортных средств BRT, предоставлять приоритет относительным и условным сигналам светофоров и выбирать соответствующие приоритетные стратегии, методы и режимы для обеспечения приоритетного управления сигналами на каждом перекрестке;
- Создать интегрированную, эффективную и всесторонне используемую сеть передачи данных для удовлетворения потребностей передачи мультимедийной информации интеллектуальной системы, бизнес-планирования и мониторинга в реальном времени, а также для удовлетворения будущего расширения, реализации взаимосвязи интеллектуальных систем BRT, и интегрироваться с интеллектуальными транспортными системами;

- Создать цифровую систему BRT и сопутствующих сервисов ИТС;
- По различным каналам предоставлять точные, удобные и эффективные информационные услуги в режиме реального времени для пассажиров, улучшать имидж общественного транспорта и повышать уровень обслуживания;
- Благодаря интеллектуальной системной интеграции «пассажиры-автобусы-дороги-станции» станут органичным целым, повысив эффективность управления и эффективность работы BRT;
- Реализовать органичную интеграцию интеллектуальной системы BRT с существующей системой управления дорожным движением и системой управления работой автобусов, а также использовать стандартизированные интерфейсы для обмена данными и бесшовной интеграции.



Рисунок 3 – Основные особенности BRT

Во второй главе «Теоретико-методологическое обоснование создания BRT» рассмотрены методы организации BRT, модели расчета BRT, оценка эффективности моделей.

Минимальные затраты на время ожидания и максимальный комфорт пассажиров являются целями пассажиров, в то время, как достижение максимальной вместимости автобуса является целью автобусной компании.

Стоимость времени ожидания автобуса пассажирам высчитывается по следующей формуле.

$$VT_{ik} = \lambda_{ik} * \frac{1}{2} \Delta t_k^2, \quad (1)$$

Где: VT_{ik} - время ожидания пассажиров на остановке i в течение периода k (Юань); i - номер автобусной остановки; k - период времени; Δt_k -

интервал отправления в пределах периода времени k ; λ_{ik} - вероятность того, что пассажиры на автобусной остановке i смогут добраться до автобусной остановки в течение k периода времени.

Для всей автобусной линии общее время ожидания пассажиров составляет

$$VT = \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^I \lambda_{ik} * \frac{1}{2} \Delta t_k^2, \quad (2)$$

Где: VT - общее время ожидания пассажиров.

Общая стоимость ожидания автобуса пассажирами составляет

$$X_1 = \gamma_1 * \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^I \lambda_{ik} * \frac{1}{2} \Delta t_k^2 = \gamma_1 * \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^I P_{ik} * \frac{1}{2} \Delta t_k^2, \quad (3)$$

Где:

P_{ik} - количество пассажиров в автобусе на автобусной остановке i за k период времени;

γ_1 - стоимость ожидания для пассажира (юань).

Стоимость заполнения автобуса пассажирами.

Во время поездки, стоимость и оценка заполнения автобуса может быть выражена дискомфортом или определенными неудобствами для пассажиров. Загруженность автобуса пассажирами может быть отражена только в том случае, если отношение количества пассажиров в автобусе на определенной остановке к общей пассажировместимости автобуса превышает коэффициент вместимости транспортного средства (ICF):

$$\Delta z = \begin{cases} 1, & \text{ICF} \leq \frac{P_{ik}}{(Q_1 + Q_2) F_k} \\ 0, & \text{ICF} \geq \frac{P_{ik}}{(Q_1 + Q_2) F_k} \end{cases}, \quad (4)$$

Где: Q_2 - число пассажирских мест в автобусе; Q_1 - номинальная пассажировместимость в автобусе; F_k - частота отправления автобусов в течение периода времени k .

Функция расстояния между пассажирами при переполнении

$$\eta = \sum_{c=1}^c (Q_{ikp} - Q_2) * L_c * \Delta z, \quad (5)$$

Где: Q_2 - число пассажирских мест в автобусе; c - обозначение переполненной остановки; Q_{ikp} - пассажиропоток автобуса, при котором q -й автобус находится в переполненном состоянии в течение k периода времени на автобусной остановке i ;

L - общая длина автобусной линии.

Затраты при работе автобуса в режиме пиковой загрузки

$$X_2 = \gamma_2 * \eta = \gamma_2 * \sum_{c=1}^c (Q_{ikp} - Q_2) * l_c * \Delta z, \quad (6)$$

Где: Q_2 - число пассажирских мест в автобусе; F_k - частота отправления автобусов в течение периода времени k ; c - обозначение переполненной остановки;

Q_{ikp} - пассажиропоток автобуса, при котором q -й автобус находится в переполненном состоянии в течение k периода времени на автобусной остановке i ; l - расстояние между двумя соседними автобусными остановками (км); γ_2 - стоимость переполненности автобуса для пассажиров (юань).

Целевая функция эксплуатационных расходов автобусной компании.

Эксплуатационные расходы автобуса

$$X_3 = \gamma_3 * L \sum_{k=1}^k \left(\frac{T_k}{\Delta t_k} \right) + \left(\sum_{i=1}^i (e_i + b_i) * (E_i + B_i) + \sum_{i=1}^i \delta_i \right) * \lambda, \quad (7)$$

Где:

T_k - общее эксплуатационное время за k период времени;

L - общая длина автобусной линии;

e - среднее время выхода пассажиров из автобуса;

b - среднее время посадки пассажиров;

δ - время разгона и замедления транспортного средства;

B - количество пассажиров в автобусе на автобусной остановке;

E - количество пассажиров, выходящих на автобусной остановке;

λ - коэффициент преобразования затрат во времени для автобусной компании;

γ_3 - средняя стоимость проезда на километр (юань).

В модели расписания отправления автобуса основными условиями являются установленные временные ограничения на интервал отправления автобуса, общее количество автобусных остановок и средний показатель полной загрузки автобуса.

Интервал отправления

$$\Delta t_{kmin} \leq \Delta t_k \leq \Delta t_{kmax}, \quad (8)$$

Где:

Δt_k - интервал отправления в пределах периода времени k .

Общее количество отправок автобусов BRT ограничено общим объемом максимального количества отправок BRT

$$\sum_{k=1}^k F_k \leq F_{max}, \quad (9)$$

Где:

F_k - частота отправления автобусов в течение периода времени k .

Условия для средней нормы по полной загрузке автобуса BRT.

Для обеспечения эксплуатационных расходов автобусной компании средняя норма полной загрузки автобуса должна быть больше минимальной нормы полной загрузки. Когда коэффициент использования вместимости автобуса составляет 50%, то можно считать, что места в автобусе заполнены. Поэтому 50% принимается за нижний предел коэффициента загрузки

автобуса.

$$ICF \geq 0.5$$

Таким образом, общая модель оптимизации расписания принимает вид.

$$\begin{aligned} \text{Min } X &= \omega_1 X_1 + \omega_2 X_2 + \omega_3 X_3 \\ \text{s. t. } \left\{ \begin{array}{l} \Delta t_{kmin} \leq \Delta t_k \leq \Delta t_{kmax} \\ \sum_{k=1}^k F_k \leq F_{max} \\ ICF \geq 0.5 \end{array} \right. , \end{aligned} \quad (10)$$

Где:

ω - вес каждого показателя;

F_{max} - общее количество отправлений автобусов BRT;

Δt_{min} - минимальный интервал отправления в течение k периодов времени;

Δt_{max} - максимальный интервал отправления в течение k периодов времени.

В третьей главе «Применение ИТС для организации BRT» рассмотрены вопросы интеграции системы BRT с интеллектуальной транспортной системой, методы реализации анализа применения ИТС.

Анализ развития систем BRT. Использование интеллектуальных транспортных технологий и системы быстрого транспорта может предоставить пассажирам быстрые, удобные, эффективные и гибкие услуги по перевозке пассажиров, основные характеристики которых проявляются в следующих аспектах. Разработанная автором физическая архитектура ИТС BRT представлена на следующем рисунке.



Рис. 4 – Физическая структура BRT интеллектуальные системы

Фактические данные получены для интеллектуальной BRT в Китае на примере города Цзинаня.

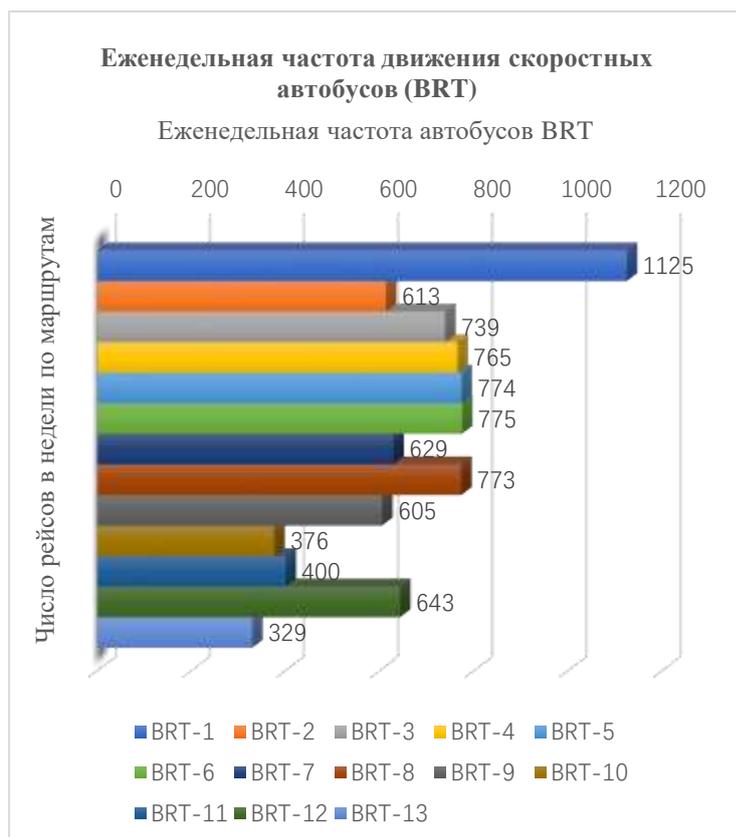


Рис. 5 – Еженедельная частота движения скоростных автобусов (BRT)

В Цзинане имеется 13 маршрутов BRT, 37 дополнительных маршрутов BRT (36 обычных и 1 пиковый пригородный) и 107 остановок BRT. Общая протяженность маршрутов BRT в Цзинане составляет 121,1 км, в среднем 167 000 пассажиров в день и 35 000 бесплатных пересадок в день. Наибольшая пропускная способность составляет 70 000 пассажиров в день. Общая еженедельная частота использования линий BRT в Цзинане составляет 8546. Конкретные недельные частоты для каждого маршрута, обслуживаемого Bus Rapid Transit (BRT).

Цзинаньская автобусная BRT-система использует модели с левосторонним и правосторонним открыванием: 18-метровые (левая и правая стороны шести верхних и нижних дверей) и 12-метровые (левая и правая стороны четырех верхних и нижних дверей) две модели, в соответствии с потребностями пассажиропотока, гибкая конфигурация. Всего в системе BRT Цзинаня 241 транспортное средство BRT.

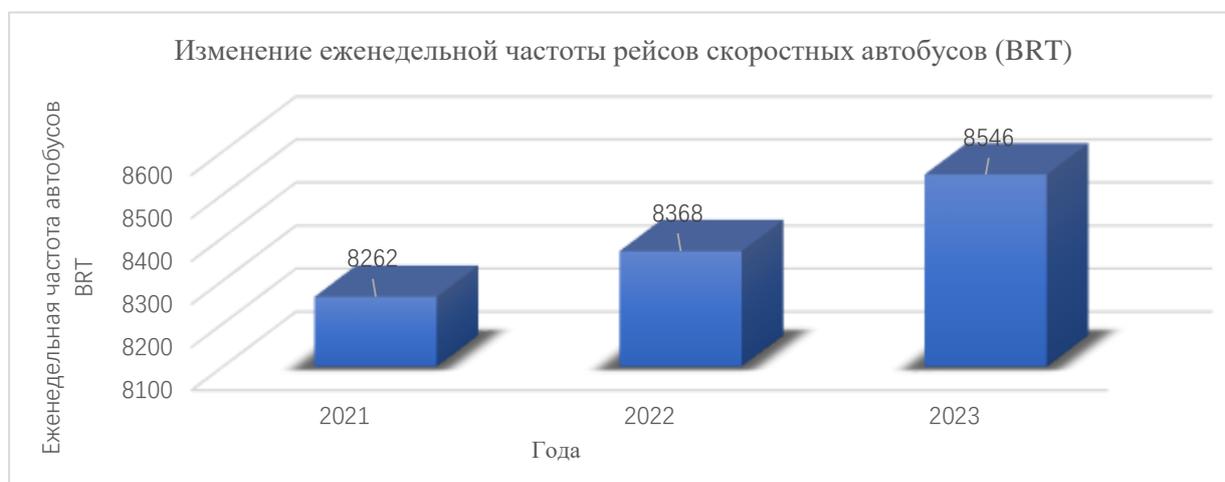


Рис. 6 –Изменение еженедельной частоты рейсов скоростных автобусов (BRT)



Рис. 7 – Маршруты BRT в Цзинане

Оригинальная интеллектуальная сетевая облачная система интеграции BRT и дороги разделена на пять модулей с точки зрения физической архитектуры, к которым относятся интеллектуальная сетевая облачная платформа управления, облачная система безопасности транспортного средства и дороги, интеллектуальная система терминалов и остановочных пунктов, интеллектуальная система маршрутной сети и интеллектуальная сетевая система придорожной инфраструктуры. Оригинальная интеллектуальная автобусная система состоит из интеллектуальной операционной системы, интеллектуальной диспетчерской системы, системы активной безопасности, интеллектуальной системы управления, системы анализа операционных решений и системы мобильных терминалов.

Необходимо добавить в существующую интеллектуальную систему BRT, интеллектуальную систему моделирования AI (Artificial Intelligence) , интеллектуальную систему корректировки автобусных маршрутов, интеллектуальную систему доступа к приливным полосам, интеллектуальную систему управления автобусами ERP.

Операционная архитектура интеллектуальной автобусной системы BRT. Интеграционная платформа общественного транспорта - это платформа для анализа и обмена информацией об общественном транспорте с использованием архитектуры больших данных для достижения общенациональной взаимосвязи информации о дорожном и общественном транспорте, унификации информации о планировании, например, автобусов BRT, совместного развития и управления эксплуатацией.

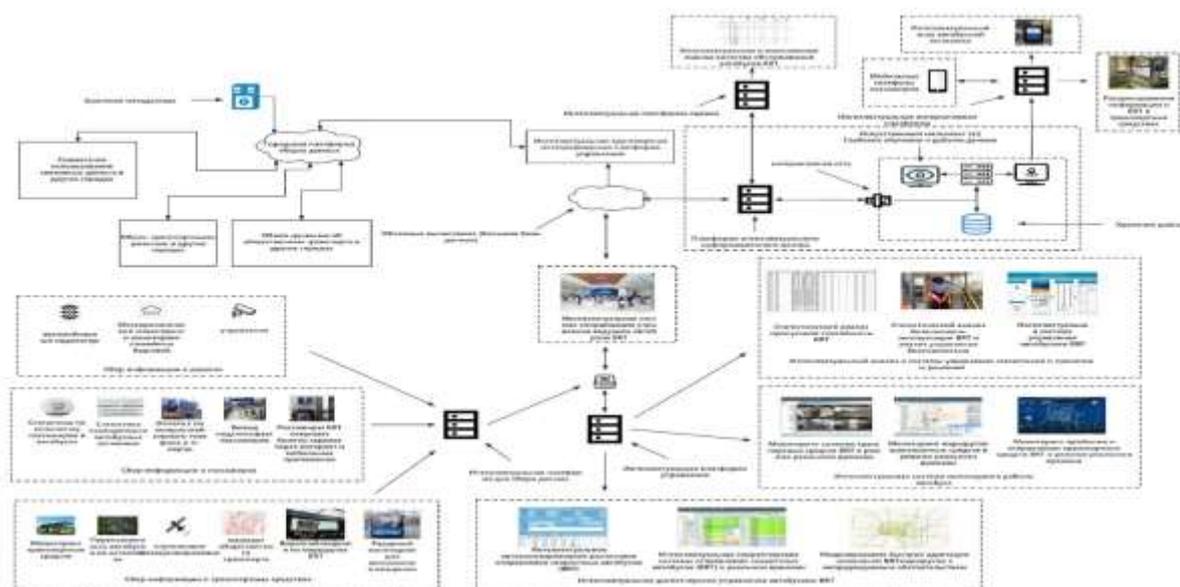


Рис. 8 – Архитектура интеграционной платформы общественного транспорта

В четвертой главе приведены конкретные результаты применения разработанных методик и моделей для анализа применения ИТС

Метод серого корреляционного и кластерного анализа позволяет оценить качества обслуживания BRT по совокупности показателей, отражающих скорость и время поездки, удобство, безопасность, экономичность, а также показатели работы предприятия. Метод серого корреляционного анализа выдвигает концепцию корреляционного анализа каждой подпоследовательности факторов, эффективно избегая недостатков традиционного математического анализа, нет ограничений на количество выборок, не будет количественных результатов, не соответствующих качественному анализу результатов ситуации, с помощью метода очень хорошо находить как последовательность подсистем качества обслуживания BRT факторов, так и общий диалоговый оборот автобусной компании, значение связи между. Таким образом, серый корреляционный анализ не только способен соотнести факторы системы оценки качества услуг BRT, но и способен оценить факторы. Результаты получены на основе фактических данных за 2017-22 годы. Полное описание моделей и результатов приведено в диссертации.

В автореферате показана полученная автором классификация качества услуг городского BRT (Табл. 1).

Для полноценного изучения данного вопроса, необходимо, в первую очередь, определить, как оптимизировать и скорректировать частоту движения BRT. В теории и практике для этого использовались различные методы. Например, существуют способы регулирования интервала отправления автобусов BRT с помощью навигационной системы GLONASS или навигационной системы BEIDOU; способы балансировки и структурирования затрат на функционирование системы BRT. Кроме того,

существует несколько методов, которые используют генетические алгоритмы (GA Genetic Algorithm) для расчета общей стоимости поездки пассажиров, пользующихся BRT. В диссертации при моделировании используется комбинирование интеллектуальных систем с системами BRT. Стоимость поездки для пассажиров и затраты автобусных компаний рассматриваются как ключевые факторы при регулировании интервала отправления автобусов BRT.

Табл. 1 – Фактическое значение индекса оценки уровня обслуживания BRT

Индикатор оценки	общественный транспорт	оценка
T ₁ (Коэффициент пересадки пассажиров)	11 (раз)	отлично
T ₂ (Среднее время пересадки)	10 (минут)	средне
T ₃ (Среднее время ожидания на остановке)	15 (минут)	средне
T ₄ (Среднее время, посадки в автобус)	2.5 (минут)	отлично
T ₅ (Среднее время в пути)	28 (минут)	хорошо
T ₆ (Средняя скорость транспорта)	15 (км/ч)	плохо
T ₇ (Коэффициент нелинейности)	150	хорошо
T ₈ (Доля приоритетных автобусных полос)	20 (%)	плохо
T ₉ (Заполненность транспортного средства в часы пик)	95 (%)	плохо
T ₁₀ (Обычно полная нагрузка транспортного средства)	61 (%)	средне
T ₁₁ (Стоимость проезда, напрямую влияет на выбор способов движения.)	2 (юаня)	хорошо

Результаты оптимизации интервалов приведены в следующих таблицах.

Таблица 2-Оптимальный интервал отправления автобуса при различных весовых факторах (утром)

ω_1	ω_2	ω_3	Δt (min)	знак нумерации	Пассажир (стоимость эксплуатации)	автобусной компании (стоимость эксплуатации)	суммарные затраты
0.3332	0.3332	0.3336	1.828586432	№.1	2013.944298	4213607.127	4215621.072
0.1428	0.1225	0.7347	3.155474526	№.2	5997.162619	4211915.388	4217912.551
0.1321	0.6346	0.2333	2.209426366	№.3	2940.190928	4212913.659	4215853.85
0.6221	0.1121	0.2658	1.376669974	№.4	1141.500613	4214927.791	4216069.291
0.2429	0.3898	0.3673	2.098015297	№.5	2651.146757	4213090.474	4215741.621

Таблица 3-Оптимальный интервал отправления автобуса при различных весовых факторах (полдень)

ω_1	ω_2	ω_3	Δt (min)	Знак нумерации	Пассажир (стоимость эксплуатации)	автобусной компании (стоимость эксплуатации)	суммарные затраты
0.3332	0.3332	0.3336	2.117391769	№.6	1739.292402	2903562.386	2905301.678
0.1428	0.1225	0.7347	3.653714868	№.7	5178.923116	2902101.467	2907280.391

0.1321	0.6346	0.2333	2.558383297	№.8	2539.226144	2902963.502	2905502.728
0.6221	0.1121	0.2658	1.594126732	№.9	985.8613666	2904702.838	2905688.699
0.2429	0.3898	0.3673	2.429379224	№.10	2289.606161	2903116.196	2905405.802

Таблица 4-Оптимальный интервал отправления автобуса при различных весовых факторах (вечером)

ω_1	ω_2	ω_3	Δt (min)	знак нумерации	Пассажир (стоимость эксплуатации)	автобусной компании (стоимость эксплуатации)	суммарные затраты
0.3332	0.3332	0.3336	2.031600636	№.11	1812.77522	3205373.103	3207185.879
0.1428	0.1225	0.7347	3.505865703	№.12	5398.310084	3203850.379	3209248.689
0.1321	0.6346	0.2333	2.454656654	№.13	2646.359142	3204749.012	3207395.371
0.6221	0.1121	0.2658	1.529554271	№.14	1027.536027	3206561.66	3207589.196
0.2429	0.3898	0.3673	2.330965165	№.15	2386.375832	3204908.047	3207294.423

Расходы автобусных компаний и затраты пассажиров различны при разном весе отдельных факторов (что продемонстрировано в таблицах 2-4). При последующем анализе можно сравнить общую стоимость BRT. Когда вес показателей: $\omega_1 = 0,3332$, $\omega_2 = 0,3332$, $\omega_3 = 0,3336$, стоимость общего целевого значения является наименьшей. Эта модель обладает очень надежной сходимостью, а оптимальный интервал BRT относительно точен и составляет $\{\Delta t$ (min)=2 минут (утренний пик, вечерний пик)}, поэтому после точного моделирования и расчета с помощью MATLAB, в итоге можно получить точный интервал отправления BRT.

Когда вес смещается в пользу пассажиров, то состав общественного транспорта увеличится, а время ожидания автобуса пассажирами и степень загруженности автобуса уменьшатся. Когда он смещен в сторону автобусных компаний, стоимость ожидания и загруженность пассажиров значительно возрастут, отражая, что влияние пассажиров на степень загруженности может в значительной степени повлиять и на интервал отправления автобуса. В то же время мы можем обнаружить, когда весовые факторы смещаются в сторону автобусной компании, суммарные затраты увеличиваются.

Благодаря расчетным выводам можно обнаружить, что различные значения весовых факторов оказывают большее влияние при моделировании с использованием генетического алгоритма. Благодаря оптимизации интервалов отправления в системе можно не только улучшить социальные преимущества BRT, но и увеличить экономические выгоды внедрения BRT. При условии точного учета интервала отправления BRT, количества отправок BRT и пассажиропотока BRT, изучается и

формируется наиболее выгодное расписание отправления автобусов BRT. На основе всестороннего учета ограничений, с целью уменьшения времени ожидания автобуса пассажирами, обеспечения комфорта пассажиров и минимальных эксплуатационных расходов автобусной компании, преимущества интеллектуальной системы используются полностью во всей системе BRT, при этом формируя быструю и эффективную интеллектуальную систему BRT.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ состояния и перспектив развития систем скоростного автобусного транспорта показал, что недостаточная во многих случаях эффективность BRT сдерживается неполными научными знаниями о применении в этой области интеллектуальных транспортных систем, методов и моделей оценки качества и управления функционированием BRT.

2. Полученные в диссертационной работе результаты являются теоретической и методической основой для решения системной задачи развития BRT включая совершенствование структуры архитектуры интеллектуальной платформы BRT, методов и моделей оценки качества функциональные BRT, моделей оперативного управления подвижным составом BRT.

3. Разработанная новая модель оценки качества услуг общественного транспорта, которая отличается от существующих тем, что позволяет всесторонне сравнивать совокупность независимых показателей, группировать и анализировать показатели без ограничения объема собранных данных, а также может работать с неполным набором данных.

4. Разработана математическая модель для оптимизации интервалов отправления BRT. Целевая функция модели представляет собой сумму общей стоимости пассажирских поездок и эксплуатационных расходов BRT, и модель реализует следующие стратегии управления:

- адаптивная стратегия управления отправление, основанная на стоимости ожидания пассажира и заполненности транспортного средства BRT.

- адаптивная стратегия управления отправление на основе стоимости и потерь пассажиров из-за заторов и среднего тарифа на километр пути BRT.

- комплексные адаптивные решения о функционировании BRT на основе сочетания стоимости, затрат времени автобусной компании, среднего тарифа на километр пути BRT, а также стоимости и потерь пассажиров из-за заторов.

4. На основе оптимизации интеллектуальной системы планирования BRT и методов прогнозирования реальной ситуации работы BRT возможно

снизить экономические затраты на 9,42%-31,08%.

4. Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов для опубликования основных научных результатов диссертаций (ВАК)

1. Ли Сяокунь. Реализация интеллектуальной системы управления BRT в г. Цзинань (КНР)/ Ли Сяокунь, Зырянов.В.В. // Мир транспорта и технологических машин. -2023-№ 3-3(82). – С. 137-143.

2. Ли Сяокунь. Кластерная оценка качества транспортного обслуживания/ Ли Сяокунь, Зырянов.В.В. // Мир транспорта и технологических машин. -2024-№ 2-1(85). С. 16-22.

3. Ли Сяокунь. Применение ИТС для организации BRT в Китае/ Ли Сяокунь, // Транспорт: наука, техника, управление -2024- № 10. С. 53-61.

5. Публикации в прочих изданиях, индексируемых в РИНЦ

4. Ли Сяокунь. Разработка и анализ интеллектуальных городских систем скоростных автобусных перевозок/ Ли Сяокунь.// НАУКА И ИННОВАЦИИ – СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ (г. Москва, 28 декабря 2023 г.). Том 1 / Отв. ред.Д.Р. Хисматуллин. – Москва: Издательство Инфинити, 2023. – С 131-136.

5. Ли Сяокунь. Состояние развития BRT и способы использования интеллектуального транспорта в BRT/ Ли Сяокунь.// Образование и наука в России и за рубежом, –2021, –№1 (Vol.77) , – С 147-151.

6. Ли Сяокунь. BRT Развитие и функционирование в Китае/ Ли Сяокунь.// Образование и наука в России и за рубежом, –2019, – №14 (Vol.62), – С 195-196.

