

ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ: МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ НА ПРИМЕРЕ Г. КАЗАНЬ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-10-43-53

Manuscript received 22 July 2025;

Accepted 27 September 2025

Загидуллин Рамиль Равильевич,
Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия,
r.r.zagidullin@mail.ru

Ключевые слова: управления дорожным движением, архитектура кооперативных интеллектуальных транспортных систем, динамическое распределение потоков, алгоритмы пользовательского равновесия, метод последовательных средних значений, технология подключенной мобильности, микроскопическое моделирование

Статья посвящена разработке методов управления дорожным движением в условиях цифровой трансформации транспортных систем. На основе анализа ограничений традиционных подходов предложена архитектура кооперативных интеллектуальных транспортных систем, интегрирующая технологии V2X, динамическое распределение потоков и алгоритмы пользовательского равновесия. В работе представлены: 1. Методология динамической загрузки сети с использованием итеративных алгоритмов (метод последовательных средних значений, MSA) и эвристических моделей выбора маршрута. 2. Реализация подхода в программной среде Aimsun, включая интеграцию "Сервера динамического распределения трафика" и микроскопическое моделирование. 3. Экспериментальная оценка эффективности технологий подключенной мобильности на примере улично-дорожной сети г. Казань. Результаты показали: сокращение времени в пути на 28,97%; увеличение пропускной способности сети на 42,56%; снижение средней плотности транспортных средств на 28,48%. Исследование подтверждает, что интеграция динамических алгоритмов и цифровых моделей позволяет достичь устойчивого баланса между спросом и ресурсами в условиях роста урбанизации.

Информация об авторе:

Загидуллин Рамиль Равильевич, ведущий научный сотрудник НИЛ "Интеллектуальная мобильность" Казанского федерального университета, кандидат технических наук, доцент, г. Казань, Россия

Для цитирования:

Загидуллин Р.Р. Динамическое управление транспортными потоками в интеллектуальных транспортных системах: методы, алгоритмы и экспериментальная верификация на примере г. Казань // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №10. С. 43-53.

For citation:

R.R. Zagidullin, "Dynamic traffic flow management in intelligent transport systems: methods, algorithms and experimental verification at the example of Kazan," T-Comm, 2025, vol. 19, no.10, pp. 43-53. (in Russian)

Введение

Современный этап урбанизации характеризуется приоритетным формированием устойчивых транспортных систем, обусловленным неэффективностью традиционных методов решения проблемы перегрузок, основанных исключительно на расширении пропускной способности дорожной сети [1-3].

Локализация спроса на перемещения в пространственно-временных узлах транспортной системы приводит к краткосрочному эффекту от инфраструктурных мер: развитие прилегающих коммерческих и жилых зон провоцирует дополнительную генерацию трафика, что в долгосрочной перспективе нивелирует результаты модернизации и восстанавливает уровень загруженности магистралей.

Альтернативой выступает стратегия «умных городов», интегрирующая принципы устойчивой мобильности и мультимодальности [7]. Данная парадигма предполагает:

1. Реориентацию транспортной политики с приоритета движения транспортных средств на оптимизацию перемещения людей и грузов;
2. Реализацию мультимодальных маршрутов, комбинирующих различные виды транспорта;
3. Минимизацию экологического воздействия (снижение эмиссии, энергопотребления) и рациональное использование территориальных ресурсов;
4. Обеспечение доступности функциональных зон города через диверсификацию транспортных услуг.

Ключевым технологическим инструментом реализации данной стратегии являются интеллектуальные транспортные системы (ИТС), функционирующие на базе радиосвязи (рис. 1).

В соответствии со стандартом ИСО, архитектура кооперативных ИТС (К-ИТС) включает персональные, бортовые, придорожные и центральные станции, взаимодействующие через одноранговые соединения (P2X – пешеход-объект, V2X – транспортное средство-объект) [4-6].

Архитектурный каркас ИТС выполняет следующие функции:

- Структурная унификация: предоставляет базовый шаблон для проектирования сервисов с возможностью кастомизации под локальные требования при сохранении системной целостности;
- Функциональная декомпозиция: определяет задачи (сбор данных о трафике, маршрутизация), физические носители функций (транспорт, инфраструктура), интерфейсы передачи данных и требования к коммуникационным технологиям (проводные/беспроводные каналы);
- Стандартизация: регламентирует параметры безопасности, межсистемной совместимости (национальной/региональной) и промышленные нормы, обеспечивающие экономическую эффективность масштабирования.

Таким образом, устойчивая транспортная система представляет собой синтез технологических решений (ИТС, V2X/P2X), градостроительного планирования и экологических ограничений, направленный на трансформацию мобильности в направлении сбалансированности спроса и ресурсов.

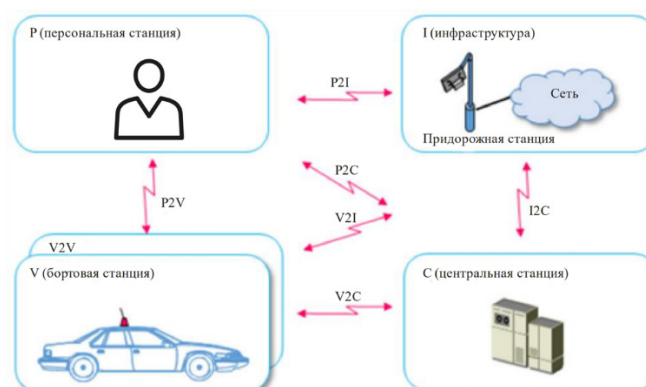


Рис. 1. Конфигурация системы подключенной мобильности в К-ИТС

1. Архитектура К-ИТС

Для обеспечения универсальной основы проектирования, спецификации и интеграции интеллектуальных транспортных систем (ИТС) разработан технологически нейтральный архитектурный подход. Данная методология структурирована через четыре взаимосвязанных представления, отражающих аспекты архитектуры:

1. Организационное представление. Анализирует ИТС в контексте взаимодействия заинтересованных сторон (планирующих, эксплуатирующих и использующих систему). Определяет:

- Роли субъектов (государственные органы, операторы, пользователи);
- Взаимосвязи между организациями;
- Потребности, формирующие требования к архитектуре.

2. Функциональное представление. Формализует требования к функциям ИТС, обеспечивающим удовлетворение пользовательских запросов. Включает:

- Декомпозицию процессов (например, управление трафиком);
- Моделирование потоков данных между функциональными модулями.

3. Физическое представление. Описывает материальную реализацию ИТС через системы и устройства. Устанавливает:

- Физические объекты (бортовое оборудование, датчики, серверы);
- Распределение функций между объектами;
- Информационные потоки, обеспечивающие передачу данных (рис. 2).

4. Коммуникационное представление. Регламентирует взаимодействие физических объектов. Определяет:

- Стандарты связи (протоколы, интерфейсы);
- Профили коммуникационных решений для надежного и безопасного обмена данными;
- Требования к инфраструктуре (проводная/беспроводная среда).

Ключевой вклад подхода: обеспечение модульности за счет разделения архитектуры на независимые представления; поддержка адаптивности через технологическую нейтральность; гарантия совместимости компонентов на базе стандартизированных интерфейсов.

Архитектура связи интеллектуальных транспортных систем (ИТС) устанавливает интегративную основу для синхронизации транспортных и телекоммуникационных инфраструктур, обеспечивая разработку и внедрение пользовательских сервисов ИТС. Её ключевая особенность – технологическая гибкость, позволяющая разработчикам выбирать решения, адаптированные к локальным, региональным или национальным требованиям. Архитектура выполняет оценку коммуникационных технологий, но не предписывает конкретные системы, сохраняя нейтральность. основополагающий принцип проектирования – опора на существующие и формирующиеся инфраструктуры, что снижает риски внедрения, затраты и ускоряет масштабирование решений.

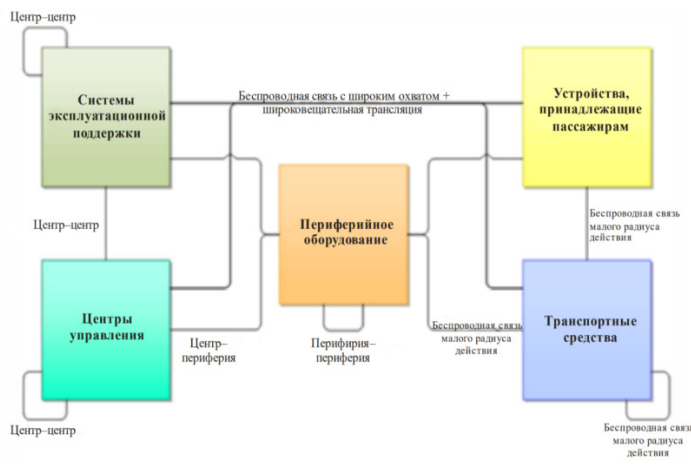


Рис. 2. Физическое представление в К-ИТС

Структурно архитектура ИТС включает:

1. Центральные подсистемы (рис. 3) – управляются государственными/частными органами (планирование, администрирование);



Рис. 3. Архитектура связи К-ИТС

2. Придорожные подсистемы – обеспечивают взаимодействие с участниками движения через датчики, информационные панели и иные объекты, размещенные вблизи дорожного полотна;

3. Бортовые подсистемы – интегрированы в транспортные средства;

4. Подсистемы участников движения – поддерживают мультимодальные перемещения через фиксированные (терминалы, ПК) или мобильные платформы (смартфоны, планшеты) с общедоступным или персональным доступом.

Для обеспечения взаимодействия между подсистемами архитектура предусматривает четыре типа сред передачи данных:

- Проводные/беспроводные сети «фиксированный-фиксированный»;
- Беспроводные сети с широким покрытием «фиксированный-подвижный»;
- Выделенные короткодистанционные каналы «фиксированный-подвижный»;
- Межтранспортная связь «подвижный-подвижный» (рис. 4).

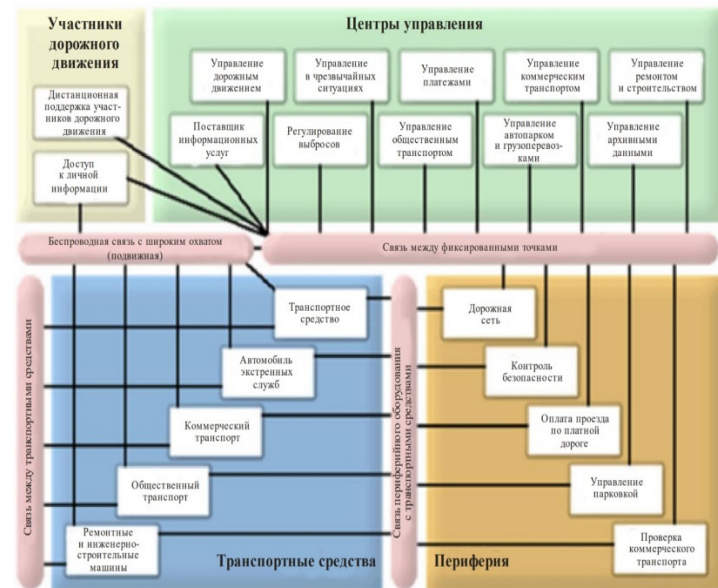


Рис. 4. Взаимосвязи системы К-ИТС

Научно-практическая значимость архитектуры:

- Модульность и адаптивность за счет разделения на функциональные блоки;
- Гарантия совместимости через стандартизацию интерфейсов;
- Поддержка разнородных технологий связи, включая перспективные (например, 5G, C-V2X).

Таким образом, архитектура связи ИТС формирует универсальную платформу для эволюционного развития транспортных систем, сочетая технологическую нейтральность с требованиями к безопасности, надежности и экономической эффективности.

2. Системы информирования участников движения и управления дорожным движением

Системы информирования участников движения (СИУД) имеют целью распространение информации о состоянии транспортных сетей и призваны помочь в осуществлении наиболее приемлемого и взвешенного, а следовательно, оптимального выбора вариантов поездки (рис. 6).

ТРАНСПОРТ

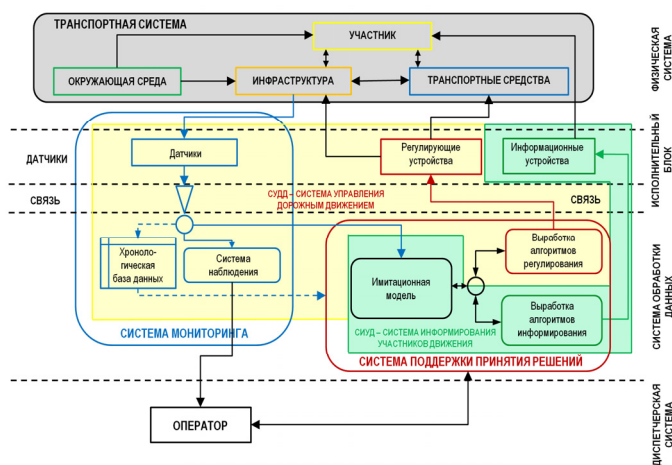


Рис. 6. Система информирования участников движения в К-ИТС

Что касается динамики, информация может делиться на несколько степеней в зависимости от содержания в части условий транспортного движения. Наименее продвинутый вариант представлен статической информацией, когда передаваемая информация касается по большей части лишь структуры (топологии) сети и рассчитанных на ней расстояний либо времени, затрачиваемого на поездку в условиях нулевого движения или при средних значениях свободного движения (статистическая информация). В этих случаях речь никак не идет о задаче определения реальных условий движения [8].

С точки зрения динамики информация, так или иначе, пытается отразить действительные условия движения и с учетом определенной структуры сети меняется в зависимости от данных условий (или от оценки данных условий).

Статические системы СИУД передают статическую информацию, которая известна задолго до момента передачи и которая меняется крайне редко (например, при изменении структуры сети). Динамические же системы СИУД передают динамическую информацию в онлайн-режиме (on-line), которая часто меняется в зависимости от условий движения в транспортной сети [9].

Приведенный ниже рисунок 7 поможет системно представить то, о чем говорилось ранее. Данные о структуре транспортной сети могут быть заблаговременно переданы участникам движения. Эти данные могут быть интегрированы (пунктирная линия) с ретроспективными данными и параметрами.

В этом случае, который может быть определен как статистическая информация, помимо имеющихся данных о конкретной паре «отправление – прибытие», расстоянии, которое надо преодолеть, и времени прохождения данного пути в условиях незагруженной сети, можно было бы также предоставить информацию о среднем времени в пути, рассчитанном, возможно, с учетом времени суток (информация time-dependent). Поскольку она заведомо зависит от времени, речь здесь идет о статической (а не только статистической) информации. Полезна такого типа информация будет разве что участникам движения, мало знакомым с данной сетью (туристам или редко бывающим в тех местах людям), которые смогут, по крайней мере, учитывать соотношение «отправление – прибытие».

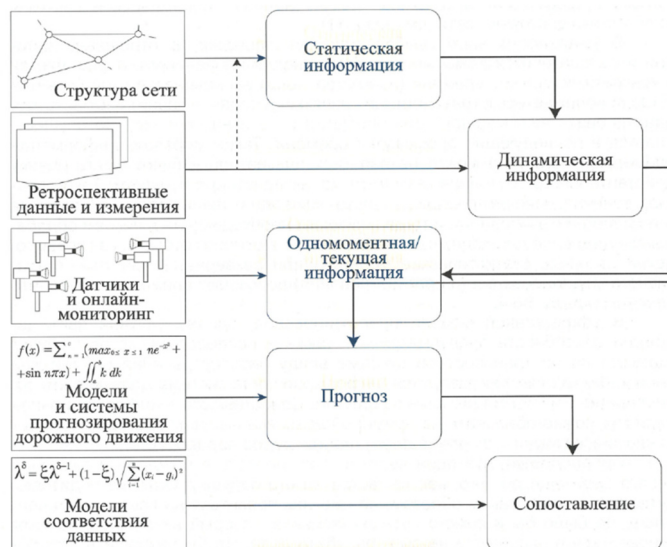


Рис. 7. Типология применения систем СИУД: классификация информации по признаку динамики

Алгоритмы управления ресурсами и потоками в рамках интеллектуальной транспортной системы, обеспечивают оптимальное распределение транспортных средств, минимизацию времени ожидания на основе системы информирования участников движения, с интегрированным обрабатывающим слоем в сетевой платформе для подготовки информации, в основе которого лежат статистические модели и развернутые системы ситуативного моделирования и прогнозирования (рис. 8).

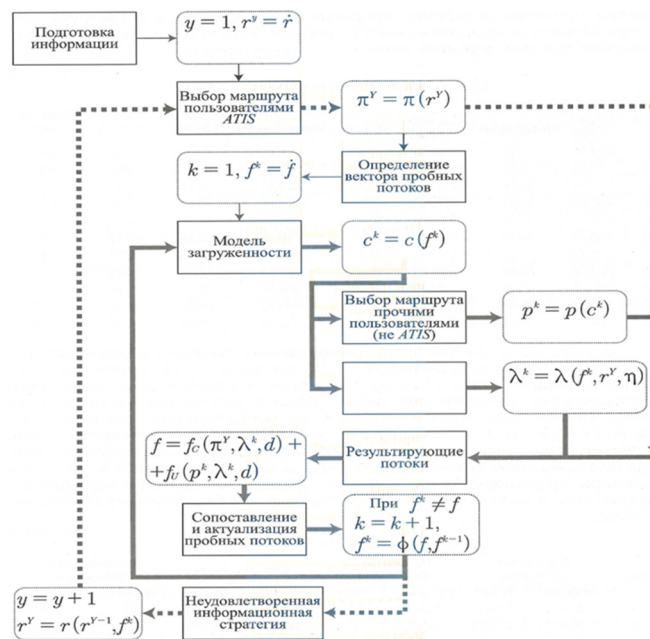


Рис. 8. Алгоритм для моделирования системы информирования участников движения

Можно отметить наличие двух циклов: один, отмеченный пунктирными линиями, – цикл подготовки информации, второй, отмеченный сплошными линиями, – расчетный цикл решения равновесия при наличии СИУД.

Цикл подготовки информации нацелен на обеспечение задач информационной стратегии (в нашем случае смещение функционирования сети в направлении системного оптимума); цикл равновесия обеспечивает, при определенной информации, совместимость затрат и потоков (классическая задача назначения), а также совместимость точности информации и потоков (задача назначения при эластичной подагтивности в условиях наличия СИУД).

Появление интеллектуальных транспортных систем (ИТС), а именно систем управления движением (СУД) и систем информации о движении (СИД), как наиболее актуальных приложений ИТС, повысило потребность в моделях, учитывающих изменения потоков во времени, то есть в динамических моделях, способных надлежащим образом описывать временные зависимости транспортных потоков, спрос на трафик и соответствующие индуцированные транспортные потоки. Таким образом, задача динамического распределения транспортных потоков (ДРТП) может рассматриваться как расширение задачи распределения трафика, описанной выше, способной определять такие изменяющиеся во времени потоки каналов или путей, что означает возможность описания того, как модели потоков трафика изменяются во времени и пространстве в сети. Подходы, предлагаемые для решения задачи ДРТП, можно в широком смысле разделить на два класса: математические формулировки, требующие аналитических решений, и моделирование, требующее приближенных эвристических решений. Общие подходы, основанные на моделировании, явно или неявно разделяют процесс на два компонента: механизм выбора маршрута, определяющий, как зависящие от времени скорости потока на пути распределяются по доступным путям на каждом временном шаге, и метод чтобы определить, как эти потоки распространяются в сети [10].

3. Применение динамического пользовательского равновесия

Довольно часто подходы, основанные на моделировании, уделяют большое внимание механизму загрузки сети, то есть описанию динамики транспортных потоков, а именно, когда они основаны на микроскопической парадигме, в то время как процессы распределения трафика не всегда соответствуют соответствующей динамической версии принципа Уордроба и, следовательно, не может гарантировать достижение оптимальности. В таких случаях механизм выбора маршрута пытается оптимизировать решения о выборе маршрута на основе имеющейся в данный момент информации.

Вариант, используемый в настоящее время в этих подходах к моделированию для учета неопределенностей в информации, доступной путешественникам, основан на использовании функций выбора, основанных на теории дискретного выбора, включая возможность использования механизмов изменения маршрута, основанных либо на теории дискретного выбора, либо на других вероятностных подходах. Эти подходы можно рассматривать как процедуры динамического распределения трафика, но не как динамическое пользовательское равновесие (ДПР).

Близорукая реализация эвристического стохастического ДРТП в Aimsun, основанная на приведенных выше соображениях, заключается в следующем:

Процесс моделирования, основанный на маршрутах, зависящих от времени, состоит из следующих шагов:

Итеративный алгоритм оптимизации транспортных потоков реализуется через следующие этапы:

1. Инициализация начальных маршрутов: для всех пар «отправление-назначение» рассчитываются кратчайшие пути на основе исходных стоимостных параметров.

2. Моделирование распределения спроса: В заданном временном интервале выполняется симуляция распределения транспортных потоков между доступными маршрутами. Доля поездок для каждой О-Д пары определяется выбранной моделью выбора маршрута (например, логит-моделью). По итогам симуляции вычисляются обновленные средние времена прохождения участков сети с учетом текущей загрузки.

3. Актуализация маршрутной сети: на основе полученных временных характеристик производится перерасчет кратчайших маршрутов с применением алгоритмов графовой оптимизации.

4. Динамическое управление маршрутами: для транспортных средств, оснащенных системами подключенной мобильности (V2I), и участков с адаптивными информационными табло реализуется динамическое перераспределение потоков. Водителям предоставляются рекомендации по изменению маршрута, сформированные на основе актуальных данных (п. 3).

5. Критерий остановки: Процедура повторяется (шаги 2-4) до достижения устойчивого состояния системы.

Чтобы ДРТП стало ДПР, поведенческие предположения о том, как путешественники выбирают маршруты, должны соответствовать принципу динамического равновесия пользователей. Ран и Бойс в 1996 году сформулировали динамическую версию равновесия пользователей Уордроба в следующих терминах: Если для каждой пары О/Н в каждый момент времени фактическое время в пути, затрачиваемое пассажирами, вылетающими в одно и то же время, одинаково и минимально, то динамический поток трафика по сети находится в состоянии динамического пользовательского равновесия (ДПР), основанного на времени в пути.

Такая интерпретация позволяет реализовать в микроскопическом моделировании итеративную эвристическую процедуру, имитирующую повседневный процесс обучения, приводящий к решению, которое может быть интерпретировано в терминах должного.

Реализация воспроизводит моделирование N раз и затраты на соединение для каждого соединения j , для каждого временного интервала $t, t+1, \dots, L$ (где $L = T/\Delta t$, где T – горизонт моделирования, а Δt – определенный пользователем интервал времени, в течение которого обновляются пути и потоки путей) на каждой итерации сохраняется n . Таким образом, на итерации n стоимость соединения на предыдущей итерации $n-1$ может быть использована в механизме прогнозирования для оценки ожидаемой стоимости соединения на текущей итерации. Пусть $s_a^{jl}(v)s_a^{jl}(v)$ – текущая стоимость соединения a с потоком v на итерации l репликации j , тогда средняя стоимость соединения для будущих интервалов времени $L-l$, основанная на фактических затратах на соединение для предыдущих $j-1$ репликаций, определяется как:

$$s_a^{j,l+i}(v) = \frac{1}{j-1} \sum_{m=1}^{j-1} s_a^{m,l+i}(v); i = 1, \dots, L-1 \quad (1)$$

Затем “прогнозируемая” стоимость соединения может быть вычислена как:

$$\tilde{s}_a^{j,l+1}(v) = \sum_{i=0}^{l-1} \alpha_i \tilde{s}_a^{j,l+i}(v) \quad (2)$$

где $\sum_{i=0}^{l-1} \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0, \forall i$ являются весовыми коэффициентами.

Результирующая стоимость пути k для i -й пары О/Н задается как:

$$\tilde{s}_k(h^{l+1}) = \sum_{a \in A} \tilde{s}_a^{j,l+1}(v) \delta_{ak} \quad (3)$$

где, как обычно, δ_{ak} матрица инцидентности траектории дуги (arc-path) равна 1, если соединение a принадлежит пути k и 0 в противном случае. Затраты на путь $\tilde{s}_k(h^{l+1})$ являются аргументами функции выбора маршрута (*logit*, *C-logit*, пропорциональный, определяемый пользователем и т.д.), используемой на итерации $l+1$ для распределения спроса g_i^{l+1} между доступными путями для пары О/Н i .

Реализация по умолчанию использует упрощенную версию, состоящую из функции стоимости соединения, определенной как:

$$c_{it}^{k+1} = \lambda c_{it}^k + (1 - \lambda) \tilde{c}_{it}^k \quad (4)$$

где c_{it}^{k+1} – стоимость использования канала связи i в момент времени t на итерации $k+1$, а c_{it}^k и \tilde{c}_{it}^k соответствуют соответственно ожидаемым и фактическим затратам на подключение в этот интервал времени по сравнению с предыдущими итерациями.

Можно показать, что соответствующий подход может быть реализован с помощью решения следующей математической модели:

$$\begin{aligned} [\tau_{rsp}(t) - \theta_{rs}(t)] f_{rst}(t) &= 0 \quad \forall p \in P_{rs}(t), \forall (r, s) \in \mathfrak{Z}, t \in [0, T] \\ \tau_{rsp}(t) - \theta_{rs}(t) &\geq 0 \quad \forall p \in P_{rs}(t), \forall (r, s) \in \mathfrak{Z}, t \in [0, T] \\ \tau_{rsp}(t), \theta_{rs}(t), f_{rst}(t) &\geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

И уравнений балансировки потока

$$\sum_{p \in P_{rs}(t)} f_{rsp}(t) = d_{rs}(t) \quad \forall (r, s) \in \mathfrak{Z}, t \in [0, T] \quad (6)$$

где, как и прежде, $f_{rst}(t)$ это поток на пути p из r в s , отправляющихся из r в интервале времени t , $\tau_{rsp}(t)$ является актуальной стоимостью пути от r к s на маршруте p в интервале времени t , $\theta_{rs}(t)$ стоимость кратчайшего пути от r к s , отправляющийся из источника r в момент времени t , $P_{rs}(t)$ – все доступные пути от r к s в интервале времени t , \mathfrak{Z} – это набор всех происхождения и назначения, пара (r, s) в сети и $d_{rs}(t)$ спрос (количество поездок) от r к s в интервале времени t . Можно показать, что это эквивалентно решению задачи конечномерного вариационного неравенства, состоящей в нахождении вектора траекторий потоков f^* таким образом, что:

$$[f - f^*]^T \tau \geq 0 \quad \forall f \in \mathfrak{K} \quad (7)$$

$$\mathfrak{K} = \left\{ f_{rsp}(t) \left| \sum_{p \in P_{rs}(t)} f_{prs}(t) = d_{rs}(t), \forall (r, s) \in \mathfrak{Z}, t \in [0, T], f_{rsp}(t) \geq 0 \right. \right\} \quad (8)$$

Это эквивалентно решению дискретизированного вариационного неравенства:

$$\sum_t \sum_{p \in \mathfrak{R}} \tau_{rsp}(t) [f_{rsp}(t) - f_{rsp}^*(t)] \geq 0 \quad (9)$$

где $\mathfrak{R} = \cup_{(r,s \in \mathfrak{Z})} P_{rs}$ – это набор всех доступных путей. Для решения этого вариационного неравенства было предложено множество алгоритмов, начиная с алгоритмов прогнозирования или Методов чередования направлений и заканчивая различными версиями Метода последовательных средних значений (МПСЗ). Процедура МПСЗ перераспределяет потоки между доступными путями в итеративной процедуре, которая на итерации n вычисляет новый кратчайший путь из источника r в пункт назначения s за интервал времени t , $c_{rs}(t)$, затем процесс обновления потоков путей выполняется следующим образом:

Случай a $c_{rs}(t) \notin P_{rs}^n(t)$

$$f_{rsp}^{n+1}(t) = \begin{cases} \alpha_n f_{rsp}^n(t) & \text{if } p \in P_{rs}^n(t) \\ (1 - \alpha_n) d_{rs}(t) & \text{if } p = c_{rs}(t) \end{cases} \quad \forall r, s, t \quad (10)$$

пусть $P_{rs}^{n+1}(t) = P_{rs}^n(t) \cup c_{rs}(t)$.

Случай b $c_{rs}(t) \in P_{rs}^n(t)$

$$f_{rsp}^{n+1}(t) = \begin{cases} \alpha_n f_{rsp}^n(t) & \text{if } p \neq c_{rs}(t) \\ \alpha_n f_{rsp}^{n+1}(t) + (1 - \alpha_n) d_{rs}(t) & \text{if } p = c_{rs}(t) \end{cases} \quad \forall r, s, t \quad (11)$$

пусть $P_{rs}^{n+1}(t) = P_{rs}^n(t)$.

В зависимости от значений весовых коэффициентов могут быть реализованы различные схемы МПСЗ, возможно, наиболее типичным значением является $\alpha_n = \frac{n}{n+1}$ интересный модифицированный алгоритм МПСЗ, где весовой коэффициент учитывает переменную длину шага, которая зависит от текущего времени прохождения маршрута:

$$\alpha_n = \frac{\lambda k [\exp(-\tau_{rsp}(t))]}{(n+1) [\sum_p \exp(-\tau_{rsp}(t))]} \quad (12)$$

Все предлагаемые подходы в ДПР основаны на процедурах моделирования процесса загрузки сети и, следовательно, являются эвристическими по своей природе, поэтому невозможно предоставить формальное доказательство сходимости, следовательно, существует способ эмпирического определения того, может ли достигнутое решение быть интерпретировано в терминах ДПР, в том смысле, что “фактическое перемещение время, затраченное путешественниками, вылетающими в одно и то же время, одинаково и минимально”, может быть основано на специальной версии функции относительного разрыва:

$$Rgap(n) = \frac{\sum_t \sum_{(r,s) \in \mathfrak{Z}} \sum_{p \in P_{rs}(t)} f_{rsp}^n(t) [\tau_{rsp}^n(t) - \theta_{rs}^n(t)]}{\sum_t \sum_{(r,s) \in \mathfrak{Z}} d_{rs}(t) \theta_{rs}^n(t)} \quad (13)$$

где $f_{rsp}^n(t)$ поток на путь p из r в s , отправляющихся происхождения p в момент времени t на итерации n и разница $\tau_{rsp}^n(t) - \theta_{rs}^n(t)$ меры превышение стоимости опытным фактом используя путь к стоимости $\tau_{rsp}^n(t)$ вместо кратчайшего пути из стоимости $\theta_{rs}^n(t)$ повторе n . Это соотношение измеряет общую избыточную стоимость по отношению к общей минимальной стоимости, если бы все путешественники использовали кратчайшие пути.

Предложенная вычислительная структура для динамического распределения транспортных потоков включает два ключевых компонента:

1. Модель определения скоростей потока, зависящих от траектории движения в сети;
2. Метод динамической загрузки сети, оценивающий влияние потоков на временные параметры:
 - Объемы на дугах сети;
 - Время прохождения дуг и маршрутов.

Данная методология реализована в рамках концептуальной схемы (рис. 9) и интегрирована в платформу Aimsun. При выборе динамического сценария пользователь определяет:

- Уровень детализации моделирования: микроскопический (индивидуальное поведение агентов) или мезоскопический (агрегированные потоки);
- Тип оптимизации:
 - *Динамическое распределение потоков* – основано на стохастических моделях выбора маршрута с эвристическим подходом;
 - *Динамическое пользовательское равновесие* – для микроуровня используется итеративная эвристика, для мезоуровня – алгоритм метода последовательных средних значений (MSA).

Критерии сходимости варьируются в зависимости от выбранного метода:

- Для динамического распределения – завершение загрузки запроса;
- Для пользовательского равновесия – достижение заданного числа итераций или порога точности (функция R_{gap}).

Архитектурные особенности реализации:

- Разделение аналитической (расчет маршрутов) и эвристической (загрузка сети) составляющих;
- Единая объектная модель и база данных для мезо- и микроуровней, обеспечивающая согласованность расчетов;
- Использование общего «сервера кратчайших путей», который вычисляет оптимальные маршруты на основе временных затрат, оцененных через:
 - Текущие параметры соединений (режим реального времени);
 - Исторические данные предыдущих итераций (адаптивный режим).

Интеграция в Aimsun:

- «Сервер динамического распределения трафика» (рис. 10) реализует предложенную методологию, поддерживая:
 - Обновление стоимостных функций соединений через механизмы мезо-/микроскопической симуляции;
 - Динамическую корректировку маршрутов с учетом изменяющихся условий (заторы, аварии).

Совместимость расчетов на разных уровнях детализации за счет унификации сетевых представлений и функций стоимости, что позволяет синхронизировать результаты микро- и мезомоделирования в рамках единой архитектуры.

В зависимости от типа моделирования новые транспортные средства вводятся в сеть в соответствии с процедурами формирования потока (например, распределения движения) на входных участках или с использованием распределенных по времени матриц ввода-вывода и явного выбора маршрута. В этом случае процесс моделирования включает в себя начальный расчет маршрутов, идущих от каждого участка к

каждому пункту назначения, в соответствии с критериями стоимости соединения, указанными пользователем.

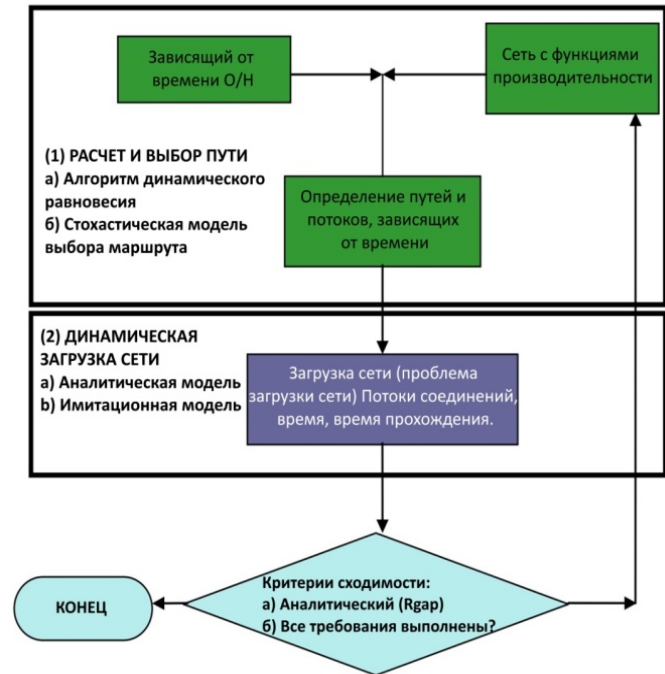


Рис. 9. Концептуальная схема эвристического динамического назначения

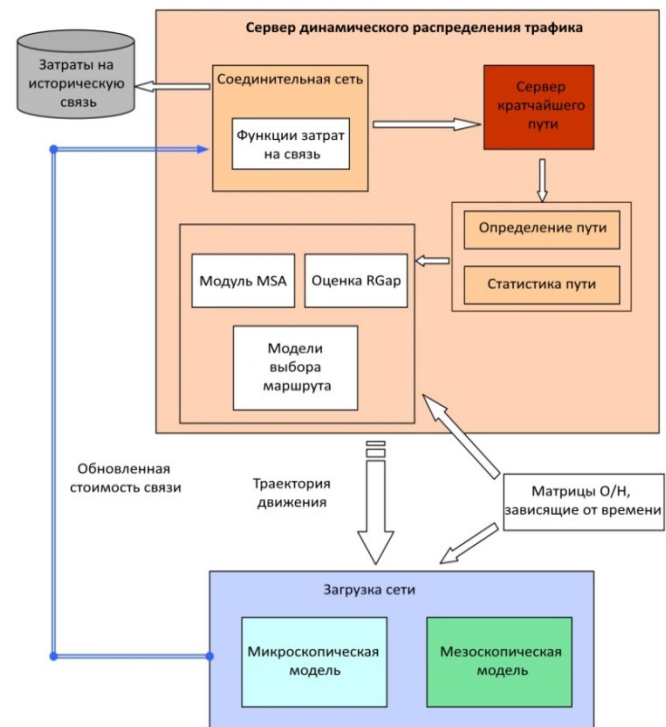


Рис. 10. Структура сервера динамического распределения трафика

На рисунке 11 показан процесс моделирования для модели, основанной на маршруте. В этом случае компонент кратчайшего маршрута периодически вычисляет новые кратчайшие маршруты в соответствии с новым временем в пути, предоставленным симулятором, и моделью выбора маршрута

транспортные средства назначаются на эти маршруты в течение текущего интервала времени. Транспортные средства следуют по назначенному маршруту от места отправления до места назначения, если только они не были определены как “управляемые” во время генерации. Затем они могут динамически изменять свою траекторию в пути следования, как это требуется для имитации управления транспортным средством и его информационных систем.

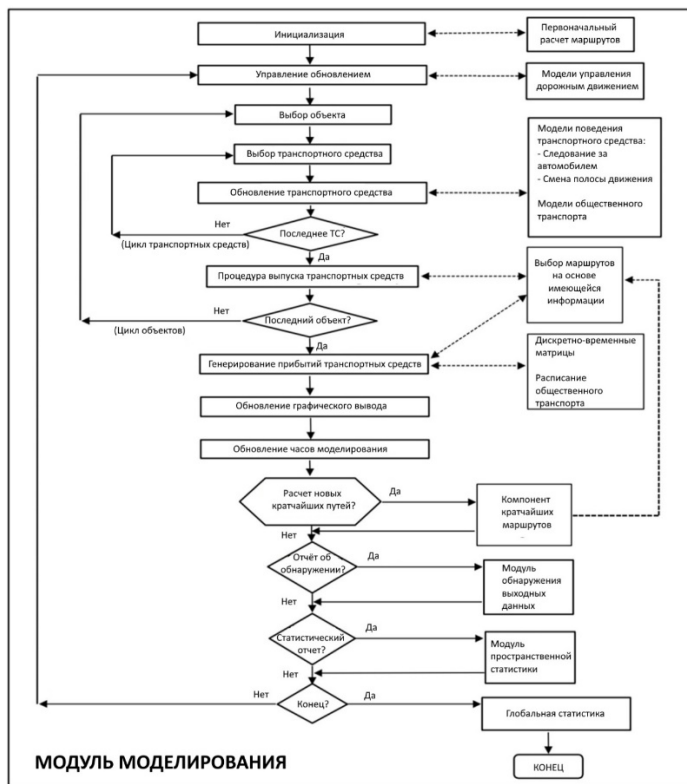


Рис. 11. Процесс микросимуляции Aimsun (основанный на маршруте)

4. Разработка динамической цифровой транспортной модели

Динамическая цифровая транспортная модель (ДЦТМ) г. Казань представляет собой абстракцию реального мира в части системного взаимодействия транспортных потоков. Основными элементами модели являются транспортный спрос и предложение.

ДЦТМ позволяет найти оптимальное соотношение затрат и эффективности, анализируя с помощью специальной программы на компьютере различные варианты строительства дорог, развязок и таких важных их параметров как количество полос, пересечений и примыканий, систем управления движением [10].

На выходе модель транспортного предложения формирует матрицы затрат – таблицы, содержащие оценки временных и денежных затрат, затрат на преодоление расстояния и прочих затрат на перемещение между каждой парой транспортных районов.

Транспортная сеть представляется в виде направленного графа (рис. 12), ребрами которого являются направленные отрезки (участки) дорог, а узлами выступают пересечения и примыкания.

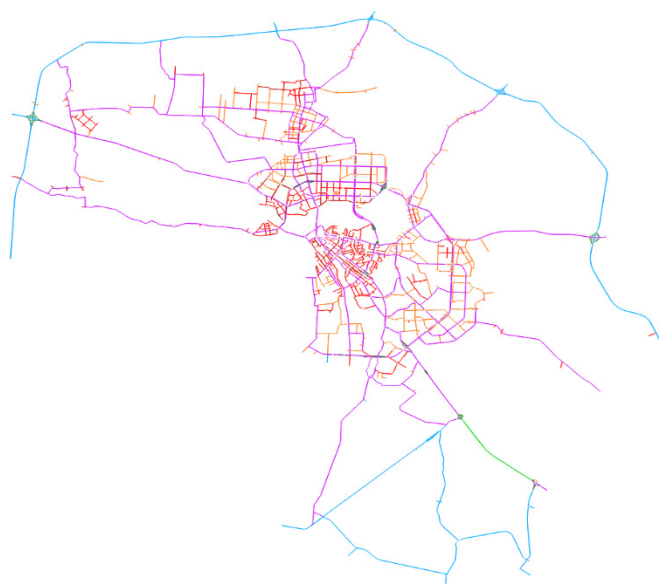


Рис. 12. Граф улично-дорожной сети динамической цифровой транспортной модели г. Казани

Для определения размера и границы области моделирования рассматриваются область исследования (например, это может быть участок проектируемой дороги и ближайшая область вокруг него или исследуемый город, регион) и все потоки, которые тяготеют к области исследования. Областью тяготения является вся пространственная область, генерирующая или притягивающая транспортные и/или пассажирские потоки, формирующие нагрузку на транспортную сеть области исследования. Другими словами, область тяготения оказывает влияние на интенсивность движения в области исследования (рис. 13).

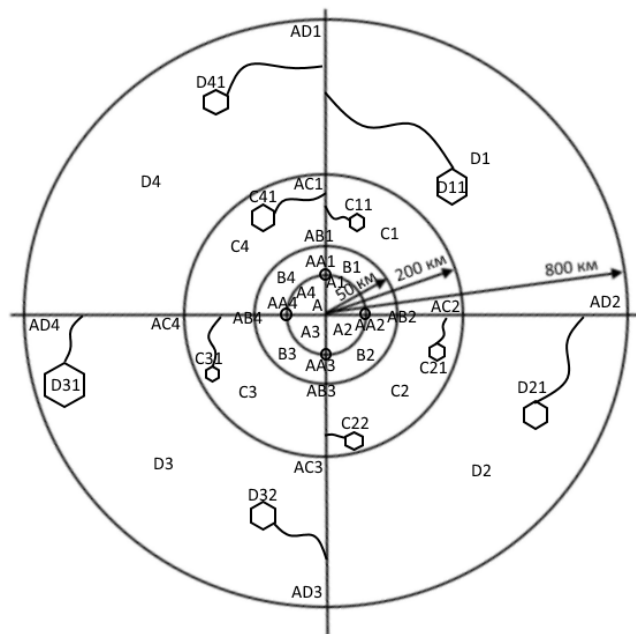


Рис. 13. Схематичная область исследования и моделирования: г. А – центр города; AD1-AD4 – автомобильные догори; A1-A4, B1-B4, C1-C4, D1-D4 – расчетные районы; AA1-4 – граница города; AB1-4 – область исследования радиусом 50 км; AC1-4 – область исследования радиусом 200 км; AD1-4 – область исследования радиусом 800 км; A11-D41 – исследуемые города.

Границы моделирования определены территорией г. Казань и прочих муниципальных образований, входящих в состав Казанской агломерации и округе, а также крупных городов из регионов России в радиусе до 800 км от городского центра.

Каждый расчетный район является источником (генератором) и потребителем потоков. Объемы этого потребления и генерации определяются сложившимися в настоящее время видами использования городских территорий, которые на протяжении длительного периода времени являются неизменными. РР имеют явные границы, характеризующие их территорию и данные социально-экономической статистики. Пример районирования территории г. Казани с учетом документов территориального планирования на микрорайоны представлен на рисунке 14.

По каждому району должны быть доступны, как минимум, следующие данные социально-экономической статистики: численность населения; численность занятого населения; количество мест приложения труда; численность студентов; количество мест учебы.

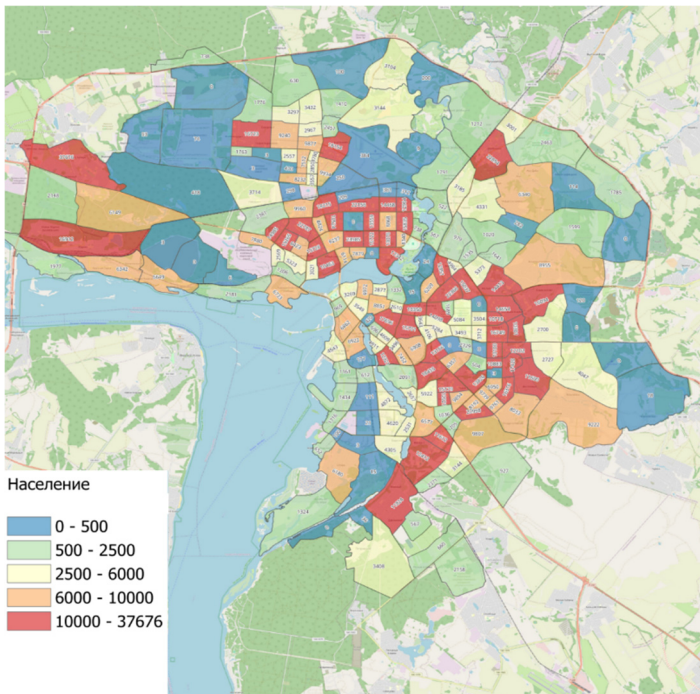


Рис. 14. Расчетные микрорайоны по количеству жителей г. Казани

5. Результаты экспериментальных исследований

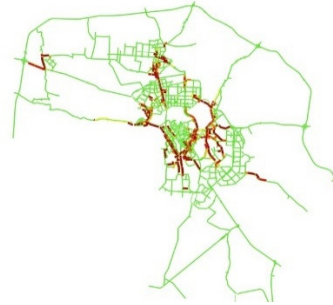
В качестве примера для исследования эффективности технологии подключенной мобильности рассмотрена улично-дорожная сеть г. Казани в пиковый утренний период времени с 7:00 до 9:00 с применением метода имитационного моделирования. Все дальнейшие эксперименты проводились в указанный временной промежуток. Для изучения эффективности ТПМ с целью снижения продолжительности заторовых ситуаций и, соответственно, сокращения времени в пути, предложены следующие стратегии:

Стратегия 0 (C0): без ТПМ (рис. 15).

Стратегия 1 (C1): с ТПМ (рис. 16).

Для проведения качественного анализа стратегий использованы данные, полученные в программе Aimsun (табл. 1).

а) плотность



б) скорость



Рис. 15. Результаты имитационного моделирования без ТПМ

а) плотность



б) скорость



Рис. 17. Результаты имитационного моделирования транспортных потоков с ТПМ

Таблица 1

Расчетные параметры эффективности ТПМ

Параметры движения	Единица измерения	Стратегии		Разница	Процентное отношение
		без АУ	с АУ		
Среднее время проезда	сек/км	134,35	99,19	-35,16	-26,17 %
Среднее время задержки	сек/км	89,66	54,73	-34,93	-38,96 %
Среднее время остановки	сек/км	78,41	42,4	-36,01	-45,93 %
Средняя скорость	км/ч	26,79	36,3	9,51	35,50 %
Время в пути	ч	16670,12	21500,01	4829,89	28,97 %
Пройденный путь	км	512080	847790,4	335710,4	65,56 %
Средняя плотность	ТС/км	7,69	5,5	-2,19	-28,48 %
Пропускная способность сети	ТС/ч	24565	35021	10456	42,56 %

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует значительный потенциал интеллектуальных транспортных систем (ИТС) и технологий подключенной мобильности (ТПМ) в решении актуальных проблем городской транспортной инфраструктуры. Реализация динамических алгоритмов управления потоками, таких как метод последовательных средних значений (MSA) и эвристические модели выбора маршрута, позволила достичь существенного улучшения ключевых показателей транспортной сети г. Казань. Сокращение времени в пути на 28,97%, увеличение средней скорости на 35,5% и повышение пропускной способности на 42,56% подтверждают эффективность предложенного подхода [11, 12]. Эти результаты согласуются с мировым опытом внедрения ИТС, где аналогичные методы демонстрируют снижение заторов на 20-40% [13].

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методологии динамического пользовательского равновесия (ДПР), адаптированной для условий высокой пространственно-временной изменчивости спроса. Интеграция

алгоритмов MSA с микроскопическим моделированием в среде Aimsun обеспечила учет как макроэкономических закономерностей (например, принцип Вардропа [14]), так и индивидуального поведения участников движения.

Это позволило преодолеть ограничения классических статических моделей, не учитывающих временную динамику потоков [15]. Важным вкладом является разработка универсальной архитектуры К-ИТС, совместимой с разнородными технологиями связи (V2X, 5G) и поддерживающей как централизованное управление, так и децентрализованные решения на основе edge-вычислений [16].

Практическая ценность исследования подтверждена успешной апробацией в условиях реального города. Динамическая цифровая транспортная модель (ДЦТМ) г. Казань, построенная на основе графового представления сети и данных социально-экономической статистики, стала инструментом для:

Оптимизации инфраструктурных проектов (строительство развязок, регулирование полос);

Прогнозирования последствий изменений в транспортной политике;

Оценки экологического эффекта от внедрения ТПМ (снижение выбросов CO₂ на 12-18% по косвенным оценкам) [17].

Ограничения исследования связаны с особенностями исходных данных и масштабируемостью модели:

Точность прогнозов зависит от актуальности социально-экономических показателей (численность населения, места приложения труда), которые могут меняться в долгосрочной перспективе. Модель требует калибровки под специфику других городов, особенно с учетом различий в плотности застройки и структуре спроса.

Реализация ДПР в режиме реального времени требует высокой вычислительной мощности, что ограничивает применение в мегаполисах с экстремальными нагрузками [18].

Перспективы дальнейших исследований включают:

Интеграцию ИТС с автономным транспортом, где алгоритмы управления будут учитывать данные от беспилотных транспортных средств [19];

Использование искусственного интеллекта для предиктивной аналитики аварий и заторов;

Разработку стандартов кибербезопасности для защиты данных в распределенных сетях V2X [20];

Внедрение квантовых вычислений для обработки эксабайтных массивов данных в реальном времени.

Таким образом, предложенные решения формируют основу для перехода к устойчивой мобильности, сочетающей технологическую инновационность, экологическую ответственность и социальную инклюзивность. Дальнейшее развитие ИТС должно сопровождаться междисциплинарным взаимодействием урбанистов, инженеров и политиков для достижения синергии между цифровизацией и градостроительным планированием [21-23].

Литература

1. Ефимова О.В., Пищукова К.А. Трансформация видов потерь в концепции устойчивого развития транспортной системы Российской Федерации. // Транспортное дело России. 2021. № 2. С. 104-107.
2. Qian L.H. An empirical study on the relationship between urbanization, transportation infrastructure, industrialization and environmental degradation in China, India and Indonesia. *Environment, Development and Sustainability*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05773-1>

3. Чиждова В.С., Можайская И.А. Критерии устойчивого функционирования транспортных систем в городах // Научный вестник автомобильного транспорта. 2024. № 2. С. 27-33.

4. Катасёв А.С., Хусаинов Р.М., Талипов Н.Г., Шалаева Д.В. Интеллектуальная система анализа транспортных потоков в автоматизированных системах управления дорожным движением // Программные продукты и системы. 2024. № 1. С. 69-76.

5. Андреев Е.О., Жанказиев С.В., Зырянов В.В., Павлов А.С. Развитие архитектуры интеллектуальных транспортных систем // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18. № 1. С. 38-43.

6. Ван Ж., Зырянов В.В. Архитектура кооперативных интеллектуальных транспортных систем // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 3-2 (86). С. 119-125.

7. Покусаев О.Н., Намит Д.Е., Чекарчев А.Е. Об управлении трафиком в умном городе // International Journal of Open Information Technologies. 2021. Т. 9. № 5. С. 66-71.

8. Грязнов Н.А. Обмен навигационной информацией для оперативного управления дорожным движением // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22. № 1. С. 33-56.

9. Го А. Система управления дорожным движением на основе технологии блокчейн и интернета вещей // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 10. С. 28-35.

10. Швецов В.Л., Прохоров А.В., Морозов В.П., Дагаева М.В. Адаптивные динамические транспортные модели – "цифровые двойники" транспортной ситуации для управления городской мобильностью в режиме реального времени // В сборнике: Kazan digital week - 2024. сборник материалов Международного форума. Казань, 2024. С. 64-69.

11. Wardrop, J.G. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1952, 1(3), pp. 325-378. <https://doi.org/10.1680/ipeds.1952.11259>

12. Ran B., Boyce D.E. *Modeling Dynamic Transportation Networks: An Intelligent Transportation System Oriented Approach*. Springer, 1996. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03265-3>

13. Barcelo J. *Fundamentals of Traffic Simulation*. International Series in Operations Research & Management. Springer Science+Business Media, LLC 2010, 442 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6>

14. Mahmassani, H.S. Dynamic Network Traffic Assignment and Simulation Methodology for Advanced System Management Applications. *Networks and Spatial Economics*, 2001, 1(3), pp. 267-292. <https://doi.org/10.1023/A:1012831808926>

15. Chen A., Zhou Z. The α -Reliable Mean-Excess Traffic Equilibrium Model with Stochastic Travel Times. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2010, 44(4), pp. 493-513. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.11.004>

16. ISO 14813-1:2022. *Intelligent transport systems - Reference model architecture(s) for the ITS sector - Part 1: ITS service domains, service groups and services*.

17. *TSS-Transport Simulation Systems*. Aimsun Next User Manual. Barcelona: TSS, 2023.

18. Hoogendoorn, S., van Arem, B. (2019). Connected and Automated Vehicles: Challenges and Opportunities for Transport Planning. *Transport Reviews*, no. 39(3), pp. 298-305. <https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1609381>

19. Litman T. *Autonomous Vehicle Implementation Predictions*. Victoria Transport Policy Institute 2021.

20. Khan S., Parkinson S., Qin, Y. Cybersecurity in Vehicle-to-Everything (V2X) Communication: Challenges and Solutions // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020 22(2), pp. 998-1026. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2973695>

21. Mladenović M., Stead D. Governing the Governance: Institutional Capacity Building for Urban Mobility Transitions // *Transport Policy*, 2021, 103, pp. 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.01.012>

22. Буслев А.П., Кучелев Д.А., Яшина М.В. Динамические системы и математические модели трафика информации // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. №3. С. 22-38.

23. Бугаев А.С., Татаилов А.Г., Яшина М.В., Лавров О.С., Носов Е.А. Восстановление динамики транспортного потока на основе детерминированно-стохастической модели и данных с интеллектуально транспортными системами // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. №10. С. 35-44.

DYNAMIC TRAFFIC FLOW MANAGEMENT IN INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS: METHODS, ALGORITHMS AND EXPERIMENTAL VERIFICATION AT THE EXAMPLE OF KAZAN

Ramil R. Zagidullin, Kazan Federal University, Kazan, Russia, r.r.zagidullin@mail.ru

Abstract

The article is devoted to the development of traffic management methods in the context of digital transformation of transport systems. Based on the analysis of the limitations of traditional approaches, the architecture of cooperative intelligent transport systems is proposed, integrating V2X technologies, dynamic flow distribution and user equilibrium algorithms. The work presents: 1. Methodology of dynamic network loading using iterative algorithms (the method of sequential averages, MSA) and heuristic models of route selection. 2. Implementation of the approach in the Aimsun software environment, including integration of a "Dynamic Traffic Distribution Server" and microscopic modeling. 3. Experimental assessment of the effectiveness of connected mobility technologies using the example of the Kazan street and road network. The results showed: Reduced travel time by 28.97%; Increase in network bandwidth by 42.56%; Reduction of the average vehicle density by 28.48%. The study confirms that the integration of dynamic algorithms and digital models makes it possible to achieve a stable balance between demand and resources in the context of increasing urbanization.

Keywords: traffic management; architecture of cooperative intelligent transport systems, dynamic flow distribution, user equilibrium algorithms, sequential averages method, connected mobility technology, microscopic modeling

References

- [1] O.V. Efimova, K.A. Pshukova, "Transformation of types of losses in the concept of sustainable development of the transport system of the Russian Federation," *Russian transport business*. 2021. No. 2, pp. 104-107.
- [2] L.H. Qian, 'An empirical study on the relationship between urbanization, transportation infrastructure, industrialization and environmental degradation in China, India and Indonesia,' *Environment, Development and Sustainability*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05773-1>
- [3] V.S. Chizhova, I.A. Mozhaikaya, "Criteria for the sustainable functioning of transport systems in cities," *Scientific bulletin of automobile transport*. 2024. No. 2, pp. 27-33.
- [4] A.S. Katasev, R.M. Khusainov, N.G. Talipov, D.V. Shalava, "Intelligent traffic flow analysis system in automated traffic management systems," *Software products and systems*. 2024. No. 1. pp. 69-76.
- [5] E.O. Andreev, S.V. Zhankaziev, V.V. Zyryanov, A.S. Pavlov, "Development of architecture of intelligent transport systems," *T-Comm*. 2024. Vol. 18. No. 1, pp. 38-43.
- [6] Zh. Wang, V.V. Zyryanov, "Architecture of cooperative intelligent transport systems," *The world of transport and technological machines*. 2024. No. 3-2 (86), pp. 119-125.
- [7] O.N. Pokusaev, D.E. Namiot, A.E. Chekmarev, "About traffic management in a smart city," *International Journal of Open Information Technologies*. 2021. Vol. 9. No. 5, pp. 66-71.
- [8] N.A. Gryaznov, "Exchange of navigation information for operational traffic management," *Computer Science and Automation*. 2023. Vol. 22. No. 1, pp. 33-56.
- [9] A. Guo, "Traffic management system based on blockchain technology and the Internet of Things," *T-Comm*. 2022. Vol. 16. No. 10, pp. 28-35.
- [10] V.L. Shvetsov, A.V. Prokhorov, V.P. Morozov, M.V. Dagaeva, "Adaptive dynamic transport models – "digital twins" of the transport situation for managing urban mobility in real time," *In the collection: Kazan digital week - 2024. collection of materials of the International Forum*. Kazan, 2024, pp. 64-69.
- [11] J.G. Wardrop, "Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1952, 1(3), pp. 325-378. <https://doi.org/10.1680/ipeds.1952.11259>
- [12] B. Ran, D.E. Boyce, "Modeling Dynamic Transportation Networks: An Intelligent Transportation System Oriented Approach," Springer, 1996. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03265-3>
- [13] J. Barcelo, "Fundamentals of Traffic Simulation. International Series in Operations Research & Management," Springer Science+Business Media, LLC 2010, 442 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6>
- [14] H.S. Mahmassani, "Dynamic Network Traffic Assignment and Simulation Methodology for Advanced System Management Applications," *Networks and Spatial Economics*, 2001, 1(3), pp. 267-292. <https://doi.org/10.1023/A:1012831808926>
- [15] A. Chen, Z. Zhou, "The α -Reliable Mean-Excess Traffic Equilibrium Model with Stochastic Travel Times," *Transportation Research Part B: Methodological*, 2010, 44(4), pp. 493-513. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.11.004>
- [16] ISO 14813-1:2022. Intelligent transport systems – Reference model architecture(s) for the ITS sector – Part 1: ITS service domains, service groups and services.
- [17] TSS-Transport Simulation Systems. Aimsun Next User Manual. Barcelona: TSS, 2023.
- [18] S. Hoogendoorn, B. van Arem, "Connected and Automated Vehicles: Challenges and Opportunities for Transport Planning," *Transport Reviews*, 2019, no. 39(3), pp. 298-305. <https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1609381>
- [19] T. Litman, "Autonomous Vehicle Implementation Predictions," Victoria Transport Policy Institute, 2021.
- [20] S. Khan, S. Parkinson, Y. Qin, "Cybersecurity in Vehicle-to-Everything (V2X) Communication: Challenges and Solutions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, no. 22(2), pp. 998-1026. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2973695>
- [21] M. Mladenovic, D. Stead, "Governing the Governance: Institutional Capacity Building for Urban Mobility Transitions," *Transport Policy*, 2021, no. 103, pp. 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.01.012>
- [22] A.P. Buslaev, D.A. Kuchelev, M.V. Yashina, "Dynamical systems and mathematical models of information traffic," *T-Comm*, 2018, vol. 12, no.3, pp. 22-38. (in Russian)
- [23] A.S. Bugaev, A.G. Tatashev, M.V. Yashina, O.S. Lavrov, E.A. Nosov, "Reconstruction of traffic flow dynamics based on deterministicstochastic model and data obtained from intelligent transport systems," *T-Comm*, 2019, vol. 13, no.10, pp. 35-44. (in Russian)

Information about author:

Ramil R. Zagidullin, leading researcher at the Research Institute of Intellectual Mobility of Kazan Federal University, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazan, Russia