

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Кафедра _____ «Прикладная математика и информатика»
(наименование)

01.03.02 «Прикладная математика и информатика»
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Компьютерные технологии и математическое моделирование
(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему «Моделирование дорожного движения»

Обучающийся

А.С. Облётов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.ф-м.н, доцент, Г.А. Тырыгина

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

к.п.н., доцент, А.В. Егорова

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Аннотация

Тема выпускной квалификационной работы – «Моделирование дорожного движения».

Объектом исследования бакалаврской работы является дорожное движение.

Предметом исследования бакалаврской работы является процесс моделирования дорожного движения.

Цель бакалаврской работы – разработка модели дорожного движения, адекватно описывающей исследуемые транспортные потоки.

Практическая значимость бакалаврской работы заключается в разработке программы в основу которой положена модель дорожного движения, адекватно описывающую исследуемые транспортные потоки.

Данная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемой литературы.

Первая глава работы посвящена постановке задачи исследования и анализу методов моделирования дорожного движения.

Вторая глава работы посвящена разработке модели дорожного движения.

В третьей главе рассматривается процесс разработки программы на основе предлагаемой модели дорожного движения и оценка ее адекватности.

В заключении описываются результаты выполнения выпускной квалификационной работы.

Бакалаврская работа состоит из 42 страниц текста, 16 рисунков, 2 таблиц и 25 источников.

Abstract

The title of the graduation work is "Modeling of Road Traffic." The focus of the study is on the field of road traffic, specifically the process of modeling traffic flows. The primary objective is to develop a traffic model that accurately represents the traffic flows being studied.

The practical significance of this research lies in the creation of a program based on the developed traffic model, which effectively describes the traffic conditions under investigation. The thesis is structured into an introduction, three main chapters, a conclusion, and a bibliography.

The first chapter outlines the research problem and examines the methodologies used in constructing traffic models.

The second chapter details the development of the traffic model. The third chapter discusses the development of a program based on the proposed traffic model and evaluates its adequacy.

The graduation work concludes with a summary of the research findings.

This Bachelor's thesis comprises 42 pages of text, includes 16 figures, 2 tables, and references 25 sources.

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1 Постановка задачи исследования и анализ методов моделирования дорожного движения.....	7
1.1 Постановка задачи исследования.....	7
1.2 Модели транспортных потоков.....	8
1.3 Аналитическое моделирование транспортных потоков.....	11
1.4 Имитационное моделирование транспортного потока.....	15
Глава 2 Обзор и анализ методов и средств имитационного моделирования транспортного потока.....	19
2.1 Методы имитационного моделирования транспортного потока... ..	19
2.2 Средства имитационного моделирования транспортного потока.....	24
Глава 3 Разработка программы для имитационного моделирования транспортного потока.....	30
3.1 Выбор средств разработки программы для имитационного моделирования транспортного потока.....	30
3.2 Реализация и тестирование программы для имитационного моделирования транспортного потока.....	33
Заключение.....	38
Список используемой литературы и используемых источников.....	40

Введение

Постоянное увеличение количества транспортных средств на автомобильных дорогах при отсутствии необходимого уровня развития транспортной инфраструктуры вызывает задержки в процессе перевозок, что влечет за собой увеличение транспортных расходов, снижение безопасности дорожного движения и увеличение загрязнения окружающей среды.

В настоящее время проводится большое количество исследований по разработке мероприятий, направленных на улучшение организации дорожного движения. Одним из актуальных направлений в области оптимизации транспортного процесса является использование такого инструмента, как моделирование дорожного движения.

Следует отметить, что моделирование дорожного движения – это широкая тема, охватывающая различные аспекты, такие как планирование транспортировки, моделирование транспортных потоков и управление дорожным движением.

Разработка модели дорожного движения, адекватно описывающей исследуемые транспортные потоки, актуальна и представляет научно-практический интерес.

Объектом исследования бакалаврской работы является дорожное движение.

Предметом исследования бакалаврской работы является процесс моделирования дорожного движения.

Цель бакалаврской работы – разработка модели дорожного движения, адекватно описывающей исследуемые транспортные потоки.

Для достижения данной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- выполнить постановку задачи исследования и провести анализ методов моделирования дорожного движения;
- разработать имитационную модель транспортного потока;

– разработать программу, реализующую имитационную модель транспортного потока, и проверить указанную модель на адекватность.

Методы исследования – аналитическое и имитационное моделирование, методы и технологии разработки программного обеспечения.

Практическая значимость бакалаврской работы заключается в разработке программы, в основу которой положена модель дорожного движения, адекватно описывающую исследуемые транспортные потоки.

Данная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемой литературы.

Первая глава работы посвящена постановке задачи исследования и анализу методов моделирования дорожного движения.

Вторая глава работы посвящена разработке модели дорожного движения.

В третьей главе рассматривается процесс разработки программы на основе предлагаемой модели дорожного движения и оценка ее адекватности.

В заключении описываются результаты выполнения выпускной квалификационной работы.

Бакалаврская работа состоит из 42 страниц текста, 16 рисунков, 2 таблиц и 25 источников.

Глава 1 Постановка задачи исследования и анализ методов моделирования дорожного движения

1.1 Постановка задачи исследования

Это одна из главных проблем нашего времени – растущая потребность в хорошей мобильности и, следовательно, в надежных и ответственных средствах транспорта. Мы все знакомы с проблемами, которые возникают в перегруженных транспортных сетях: города особенно страдают от пробок, перегруженных дорог, загрязнения воздуха и шума.

Рассмотрим проблему транспортного потока.

Транспортный поток – это область исследования движения отдельных водителей и транспортных средств между двумя точками и их взаимодействия друг с другом.

Задачей теории транспортных потоков является описание точным математическим способом взаимодействия между транспортными средствами, водителями и инфраструктурой. Инфраструктура состоит из системы автомобильных дорог и всех ее эксплуатационных элементов, включая устройства контроля, указатели и разметку.

Теории транспортных потоков является незаменимым элементом всех моделей дорожного движения и инструментов анализа, которые используются при проектировании и эксплуатации улиц и автомагистралей [12].

Моделирование транспортных потоков – это создание рабочей модели дорожного движения, соответствующего движению в реальных условиях на автомобильных дорогах и улицах. Данная модель необходима для выработки и обоснования принятия решений в области организации и оптимизации дорожного движения [6].

Моделирование транспортных потоков является важным инструментом для исследования дорожного движения. Это позволяет планировщикам максимально эффективно использовать имеющиеся бюджеты и ресурсы при

расширении или реконструкции транспортных систем.

Модели транспортных потоков помогают понять влияние различных мер на объем дорожного движения и транспортный поток при различных обстоятельствах.

Таким образом, моделирование транспортных потоков создает прочную основу для принятия правильных и экономически эффективных решений, делая движение и мобильность безопасными, устойчивыми, справедливыми и устойчивыми.

Чтобы лучше представить транспортный поток, были установлены взаимосвязи между тремя основными характеристиками: потоком, плотностью и скоростью движения.

Эти отношения помогают в планировании, проектировании и эксплуатации дорожных сооружений.

Задачей настоящего исследования является исследование и разработка модели транспортного потока.

1.2 Модели транспортных потоков

Модели транспортных потоков подразделяются на отдельные классы в зависимости от математических формул, на основе которых они получены, и в целом уровня детализации, который они обеспечивают.

Выделяются следующие классы моделей транспортных потоков:

- макроскопические модели;
- микроскопические модели;
- гибридные модели.

Рассмотрим особенности каждого класса транспортных моделей [21].

Макроскопические модели рассматривают транспортный поток аналогично газам или жидкостям.

Они должны удовлетворять уравнению неразрывности, связывающему изменения плотности с градиентами транспортного потока (1):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность потока;

Q – поток.

Макроскопические модели не способны отразить поведение отдельных транспортных средств, что имеет важные последствия, например, невозможно смоделировать динамическую реакцию потоков на дорожные условия, т.е. перенаправление на альтернативный проезд, поскольку потоки сами по себе не сохраняют понятие происхождения и назначения. В общем, любые изменения условий и, следовательно, локальных потоков могут потребовать дорогостоящего перерасчета потоков во всей сети с целью установления нового равновесия.

Вместе с тем, из-за низких требований к точности макроскопические модели работают значительно быстрее.

Кроме того, поскольку они не содержат большого количества деталей, они не требуют точных настроек и хорошо справляются с недостатками входных данных.

Микроскопические модели работают на уровне отдельных транспортных средств, поэтому позволяют получить разнородное и гораздо более подробное описание, включая отдельные положения, скорости, ускорения.

Возникающая динамика является результатом взаимодействия между отдельными агентами. Поведение автомобиля зависит от поведения его соседей. Чтобы напоминать человеческое поведение, взаимодействия часто задаются сложной математической формулой, что отрицательно влияет на производительность моделирования.

Хотя микроскопические модели могут предоставить ценные детали, полезные, среди прочего, для целей визуализации, они также требуют очень точных настроек в отношении параметров модели и характеристик

окружающей среды, например, количества линий, физического представления пересечений (рисунок 1).

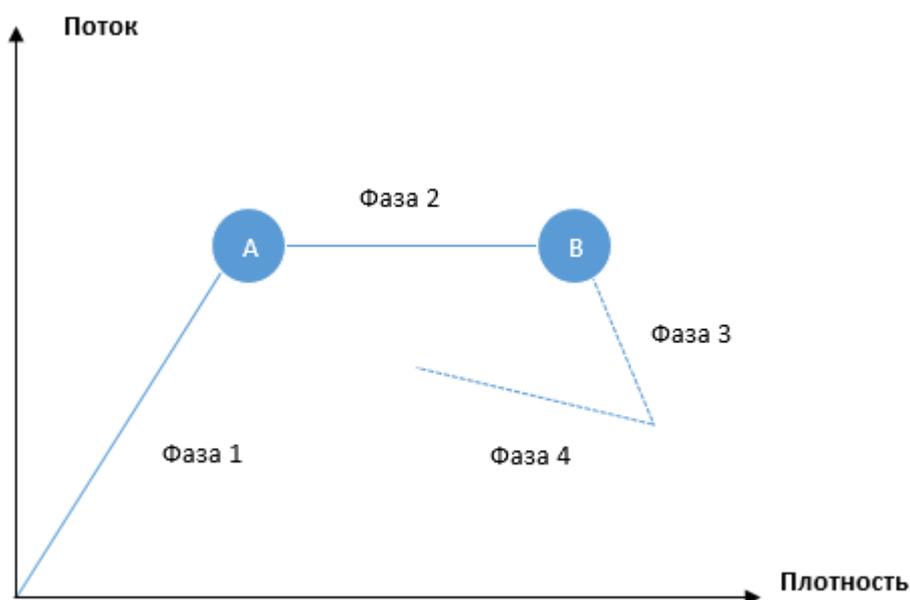


Рисунок 1 – Фазы движения на типовой микроскопической диаграмме потока (усеченный треугольник)

Одним из основных преимуществ является то, что каждое транспортное средство знает пункт отправления и назначения и может автоматически выбирать лучший маршрут между ними. Маршрут можно впоследствии изменить в режиме онлайн в ответ на изменения условий, например, на заторы.

«Гибридные модели, способные сочетать оба подхода, позволяют рассматривать различные звенья дорожной сети с разным уровнем детализации. Переключившись с более общего макроскопического вида на микроскопический, можно смоделировать зону особого интереса с повышенной точностью, сохраняя при этом ресурсы во внешних областях» [20].

Подобные подходы в последнее время подвергаются обширным исследованиям.

Гибридные модели явно используют преимущества макроскопических и микроскопических моделей, применяя их в отдельных областях.

1.3 Аналитическое моделирование транспортных потоков

Аналитическое моделирование – это математический подход к моделированию, который предполагает использование сложных вычислений, часто с многочисленными переменными и факторами, для понимания данных, формирования прогнозов и принятия обоснованных бизнес-решений.

Это метод, который превращает большой объем разнообразных данных в полезную информацию путем установления взаимосвязей между различными факторами, влияющими на конкретный результат.

Вот некоторые ключевые моменты аналитического моделирования:

- решения, основанные на данных, что позволяет лидерам принимать решения на основе данных, а не предположений или догадок;
- логическая структура информации. Аналитическое моделирование логически структурирует информацию, что упрощает отслеживание результатов до конкретных источников;
- доступность совместного использования и улучшения. Объективная природа аналитического моделирования означает, что его можно использовать в качестве общей основы для обсуждения внутри организации.

Важно отметить, что для эффективности аналитического моделирования необходимы точные и актуальные данные. Качество процесса сбора данных так же важно, как и само моделирование.

Кроме того, хотя аналитическое моделирование является мощным инструментом, оно не является универсальным решением, и его необходимо применять с надлежащей техникой и осторожностью [3].

Рассмотрим математическое описание транспортного потока [10].

Определим основные характеристики.

k – плотность (концентрация) транспортных средств на участке дороги (в единицах транспортных средств на километр), которая определяется по формуле (2):

$$k = \frac{N}{L}, \quad (2)$$

где L – длина дороги;

N – количество транспортных средств, занимающих участок дороги длиной L .

Средняя скорость транспортного потока по времени \tilde{v}_t определяется как среднее арифметическое скоростей транспортных средств, проезжающих точку (3):

$$\tilde{v}_t = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n. \quad (3)$$

Средняя пространственная скорость потока \tilde{v}_s определяется как среднее гармоническое значение скоростей, проходящих через точку за определенный период времени. Она также равна средней скорости на протяжении проезжей части (4):

$$\tilde{v}_t = \tilde{v}_s + \frac{\sigma_s^2}{\tilde{v}_s}. \quad (4)$$

Средняя скорость во времени выше, чем средняя скорость в пространстве, но различия варьируются в зависимости от степени изменчивости скорости транспортных средств. На высоких скоростях

(свободный поток) различия незначительны, тогда как в условиях заторов они могут различаться в 2 раза.

Переменные потока q , плотности и средней пространственной скорости связаны следующим образом (5):

$$q = k\tilde{v}. \quad (5)$$

На рисунке 2 показана фундаментальная диаграмма транспортного потока [11].

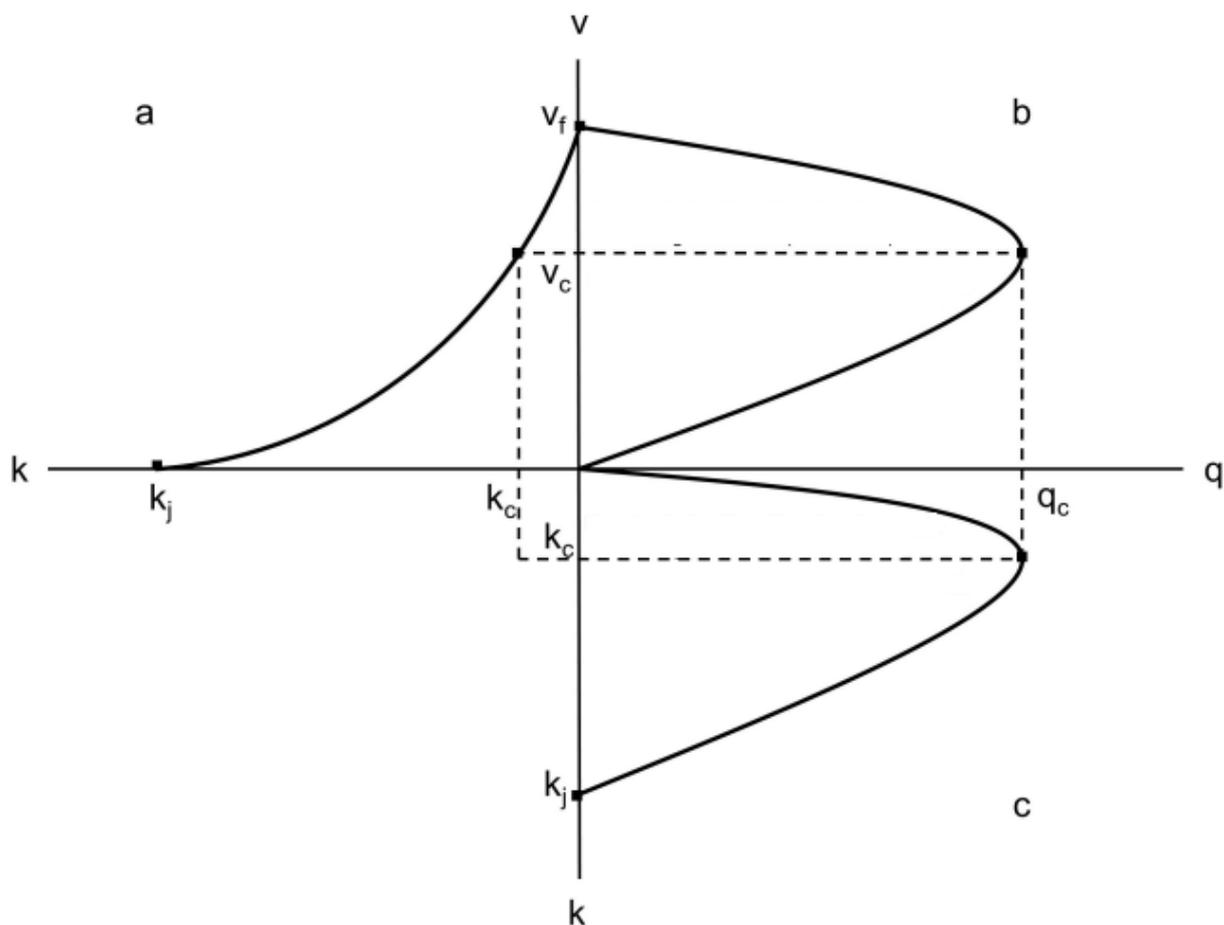


Рисунок 2 – Фундаментальная диаграмма транспортного потока

Стандартное инженерное соотношение между средней плотностью движения k , т.е. средним количеством транспортных средств на единицу

длины вдоль участка шоссе в данный период времени T , и средним потоком транспортных средств q , т.е. количеством транспортных средств, проезжающих по участку в единицу времени, усредненное за период T , как схематически показано в квадранте (с) на рисунке 1, широко известно, как фундаментальная зависимость транспортного потока [9].

Эту зависимость можно эквивалентно выразить как зависимость скорости-плотности или скорости-потока с использованием средней скорости v транспортного средства за период T , как показано в квадрантах (а) и (б) на рисунке 1, соответственно.

Три ключевые переменные дорожного движения, определяющие фундаментальную диаграмму:

- поток транспортных средств: $q : q \in [0, q_c]$;
- плотность дорожного движения $k : k \in [0, k_j]$;
- средняя скорость транспортного средства: $v : v \in [0, v_f]$.

Эти переменные связаны известным тождеством (5).

На рисунке 1 показано следующее макроскопическое явление транспортного потока: когда по участку шоссе нет транспортных средств (т. е. $k = 0$), поток равен нулю, что позволяет транспортным средствам въезжать на этот участок со скоростью свободного потока v_f . По мере увеличения плотности поведение водителя становится ограниченным, что приводит к постепенному снижению средней скорости автомобиля.

Однако соответствующий транспортный поток продолжает увеличиваться до тех пор, пока участок не достигнет критического состояния, характеризующегося плотностью k_c и скоростью v_c , соответствующими максимальному потоку q_c .

Все промежуточные состояния движения до критической точки в технической литературе называются свободным потоком, а в экономической литературе – перегруженным.

Любое дальнейшее увеличение плотности сверх критического уровня k_c приводит к резкому снижению скорости из-за дисфункционального поведения вождения, возникающего из-за нестабильности дорожного движения, что также приводит к уменьшению потока.

В конечном итоге участок достигает тупика, то есть состояния нулевой скорости и нулевого расхода, характеризующегося плотностью пробок k_j .

Таким образом, кривые плотности потока и скорости потока составляют часть, изгибающуюся назад, как показано на рисунке 1.

Состояния движения в области изгиба назад в инженерной литературе называются насыщенными или перегруженными, а в экономической литературе – гиперперегруженными.

1.4 Имитационное моделирование транспортного потока

Имитационное моделирование – это метод, который позволяет изучать сложную систему или объект в лаборатории, а не в реальных условиях. Обычно это быстрее и дешевле, чем тестирование реальной системы, а во многих случаях позволяет изучить характеристики системы еще до начала создания реального объекта.

Различные виды имитационного моделирования используются в технике уже много лет.

Масштабная модель имела значительную ценность при изучении конструкций, гидравлических систем, аэродинамических систем и т.д. Даже некоторые контролируемые эксперименты можно считать моделированием, поскольку они контролируются таким образом, чтобы исключить одну или несколько важных переменных работы системы.

Одной из важных задач имитационного моделирования является изучение аналогичных систем, то есть систем, имеющих те же математические отношения, что и рассматриваемая система.

«Компьютерное имитационное моделирование – дисциплина, набирающая популярность как в социально-экономической сфере, так и в промышленности. Проектировщики, менеджеры программ, аналитики и инженеры используют компьютерное моделирование, чтобы понять и оценить сценарии «что, если».

Компьютерное имитационное моделирование может помочь в проектировании, создании и оценке сложных систем путем репликации реальной или предлагаемой системы с использованием компьютерного программного обеспечения, когда изменения в реальной системе трудно реализовать, связаны с высокими затратами или непрактичны» [25].

Преимущества имитационного моделирования:

- условия могут быть различными, а результаты – исследованными;
- критические ситуации можно исследовать без риска;
- экономическая эффективность;
- имитационное моделирование можно ускорить, чтобы можно было легко изучать поведение в течение длительного периода времени;
- имитационное моделирование можно замедлить, чтобы более внимательно изучить поведение;
- имитационное моделирование позволяет исследовать вопросы и сценарии «что, если» без необходимости экспериментировать с самой системой;
- возможность выявить узкие места в потоках материалов, информации и продуктов;
- помогает понять, какие переменные наиболее важны для производительности системы.

Недостатки имитационного моделирования:

- измерение влияния одного свойства на другое, проведение первоначальных измерений и создание самой модели (например, аэродинамических труб) может оказаться дорогостоящим занятием;

- чтобы смоделировать что-либо, необходимо глубокое понимание и осознание всех задействованных факторов. Без этого симуляцию невозможно создать;
- это трудоемкий и дорогостоящий процесс, поэтому его не следует использовать, если аналитический метод может дать более быстрые результаты;
- качество результатов исследования зависит от качества модели и навыков моделиста, которому требуется специальная подготовка.

Следует отметить, что имитационное моделирование дорожного движения на современных компьютерах в последние годы вызвало значительный интерес.

При изучении моделирования дорожного движения можно представить трафик с конкретной желаемой характеристикой и в желаемых количествах, тогда как получить характеристику в полевых условиях может быть очень сложно [24].

Более того, при изучении дорожного движения может возникнуть существенная опасность при проведении полевых испытаний, тогда как ту же ситуацию можно изучить с помощью моделирования без риска.

Таким образом, имитационное моделирование дорожного движения на компьютерах – это виртуальная копия реальных сценариев дорожного движения, позволяющая получить реалистичное и подробное представление о мультимодальных транспортных потоках и взаимодействии различных транспортных средств и участников дорожного движения.

Выводы к главе 1

В процессе работы над первой главой были сделаны следующие выводы:

- задачей теории транспортных потоков является описание точным математическим способом взаимодействия между транспортными средствами, водителями и инфраструктурой;

- модели транспортных потоков подразделяются на отдельные классы в зависимости от математических формул, на основе которых они получены, и в целом уровня детализации, который они обеспечивают;
- кривые плотности потока и скорости потока составляют часть, изгибающуюся назад;
- состояния движения в области изгиба назад в инженерной литературе называются насыщенными или перегруженными, а в экономической литературе – гиперперегруженными.

Имитационное моделирование дорожного движения на компьютерах – это виртуальная копия реальных сценариев дорожного движения, позволяющая получить реалистичное и подробное представление о мультимодальных транспортных потоках.

Глава 2 Обзор и анализ методов и средств имитационного моделирования транспортного потока

2.1 Методы имитационного моделирования транспортного потока

Рассмотрим и проанализируем известные подходы к имитационному моделированию транспортного потока.

В работе [7] предлагается подход к исследованию транспортных потоков в условиях переполненных дорог с помощью моделей массового обслуживания с двумя очередями для описания водительского поведения и образования заторов на нерегулируемых пересечениях.

Проверка численных значений, полученных с помощью аналитической модели, проведена с помощью имитационной модели, созданной на языке GPSS. Вычислительные эксперименты с моделью проведены в среде GPSS World Student Version (рисунок 3).

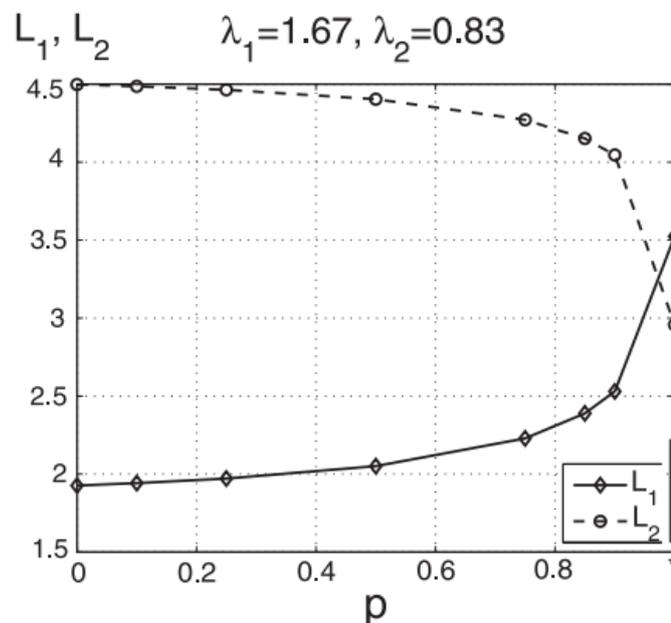


Рисунок 3 – График зависимости средней длины очередей от вероятности при $\lambda_1 = 1.67\%$

Рассмотрим подход к имитационному моделированию транспортных потоков, использующий модели, основанные на данных (МОД).

МОД – это чисто статистическая модель, которая использует закономерности в данных о трафике для прогнозирования. Было показано, что существует множество повторяющихся закономерностей в спросе на поездки, транспортных потоках и других показателях дорожного движения.

Схема подхода к имитационному моделированию транспортного потока на основе МОД показана на рисунке 4.

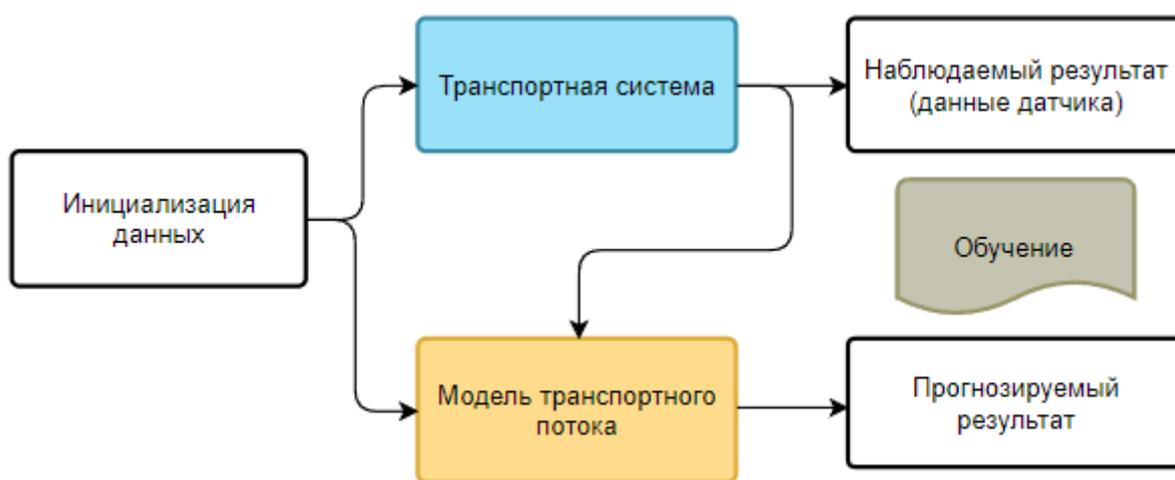


Рисунок 4 – Схема подхода к имитационному моделированию транспортного потока на основе МОД

Используя эти повторяющиеся закономерности, иногда корректируемые с использованием данных в реальном времени, можно сравнивать ситуации, что позволяет модели составить прогноз на основе прошлых событий. В первые годы использования моделей, основанных на данных, в большинстве исследований использовались статистические подходы к прогнозированию трафика в одной точке.

«Однако большинство классических подходов оказались «слабыми» или неадекватными в условиях нестабильного дорожного движения или сложных дорожных условий. Следовательно, исследования были сосредоточены на подходах, основанных на вычислительном интеллекте, таких как нейронные и

байесовские сети, нечеткие и эволюционные методы. Кроме того, увеличился размер доступных наборов данных, содержащих как структурированные, так и неструктурированные данные» [15].

МОД позволяет повысить точность имитационного моделирования дорожного движения в реальных транспортных сетях с приложениями в системах поддержки принятия решений в реальном времени и городском планировании.

Рассмотрим подход, основанный на применении для разработки имитационной модели транспортного потока аппарата сетей Петри. «Анализируется проблема преобразования исходной графовой схемы дорожной системы в соответствующую ей сеть Петри. Предлагается алгоритм такого автоматического преобразования. Рассматриваются несколько подходов к обработке конфликтных ситуаций, которые должны разрешаться на основе тех или иных правил дорожного движения» [5].

Исходными данными для алгоритма преобразования является описание схемы дорожного движения в виде ориентированного графа.

Алгоритм выполняет нормализацию этой схемы и обрабатывает все конфликтные ситуации. Выходом алгоритма является искомая сеть Петри, пример которой показан на рисунке 5.

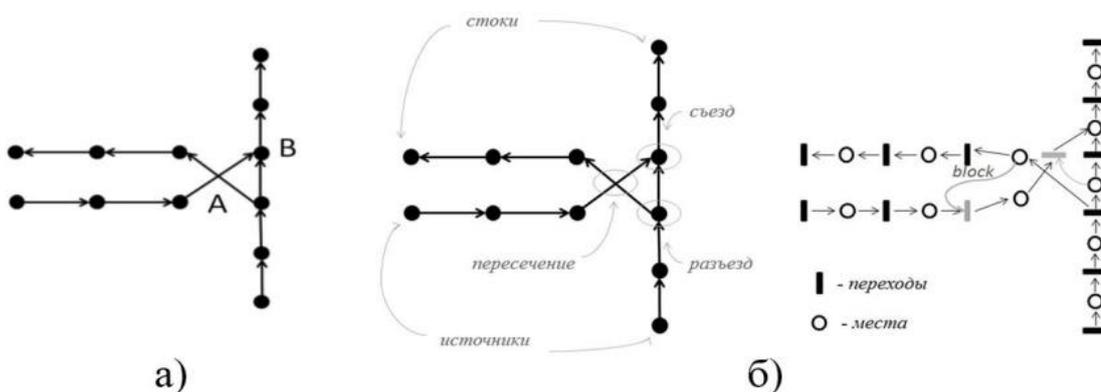


Рисунок 5 – Преобразование исходной модели (а) в сеть Петри (б)

Разработана программа, реализующая предлагаемую имитационную модель, на которой проведены численные эксперименты.

Представляет интерес подход к имитационному моделированию транспортных потоков, основанный на применении улично-дорожной сети (УДС).

УДС – это совокупность улиц, площадей и дорог общегородского и районного значения, соединяющие жилые и промышленные районы города между собой, по которым осуществляется движение транспорта и пешеходов [8].

Схемы УДС показаны на рисунке 6.

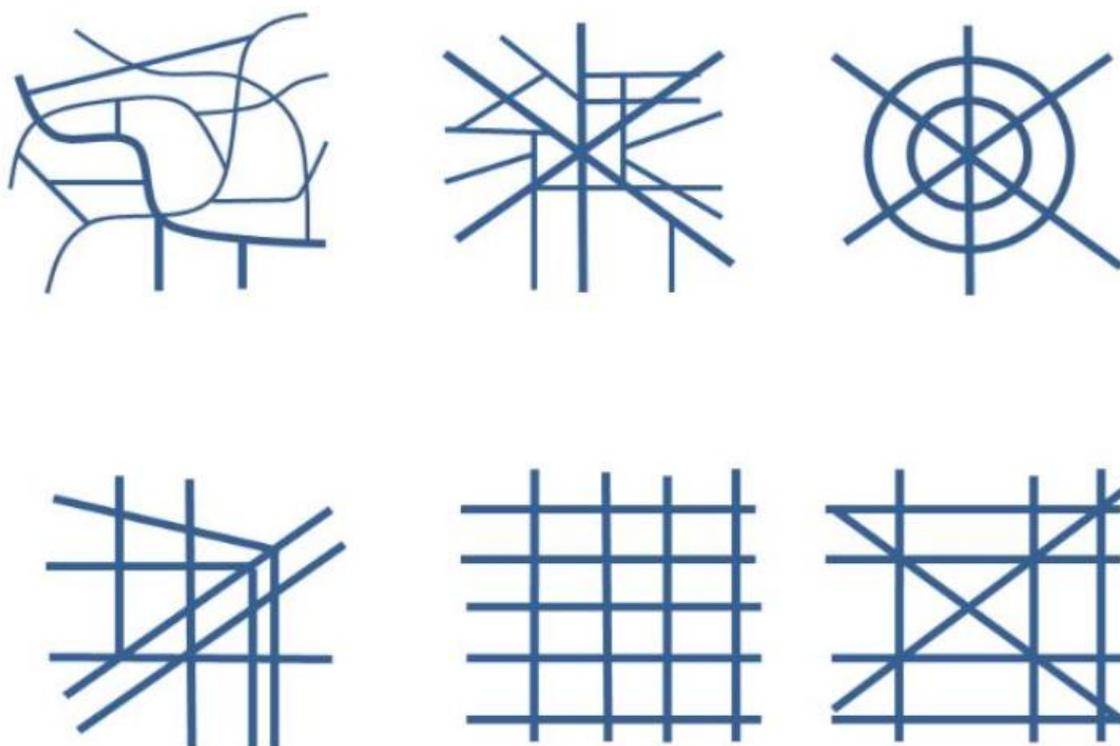


Рисунок 6 – Схемы улично-дорожных сетей

Для математического моделирования УДС используется макроскопическая фундаментальная диаграмма (МФД) транспортного потока.

Суть МФД состоит в том, что высокая плотность влияет на транспортный поток даже при недостаточной пропускной способности. Это

контрастирует с единственной дорогой с узким местом, где в случае высокого спроса отток будет на полную мощность (или скорость разгрузки очереди) [13].

Эта внутренняя перегрузка может иметь место только в том случае, если (хвост) перегрузки влияет на пропускную способность (рисунок 7).

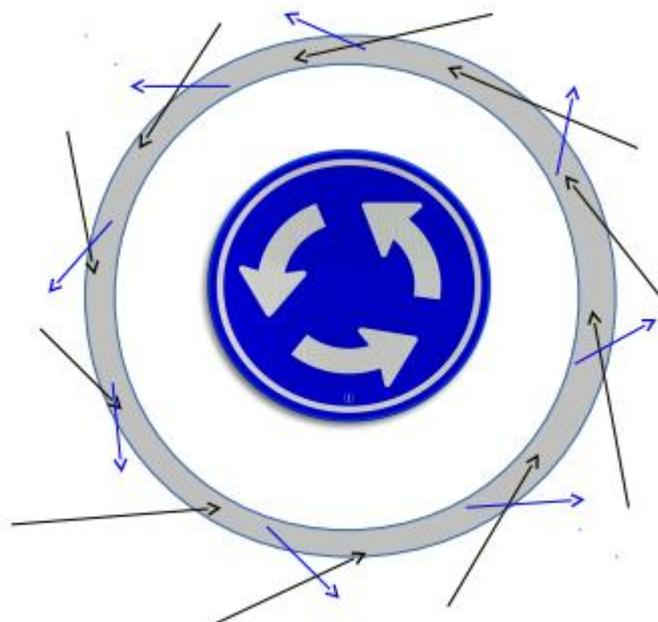


Рисунок 7 – Имитация влияния перегрузки УДС на ее пропускную способность

Так обстоит дело с эффектами обратного разлива, например, хвост очереди растет назад и тем самым влияет на водителей, которые хотят выбрать выход, не минуя узкое место.

Поскольку существует связь между количеством транспортных средств в зоне и оттоком, можно также разработать динамическую имитационную модель. В этой модели территория разбивается на зоны, а транспортный поток рассчитывается с помощью МФД.

В каждой из МФД реализован принцип, согласно которому накопление определяет отток. Интересная часть этой концепции заключается в том, что

очередь за пределами защищенной сети также влияет на поток трафика в этой зоне.

Следовательно, существует компромисс между пропуском транспортных средств в защищенную зону, задержкой в защищенной зоне или предоставлением им возможности ждать снаружи, задерживая транспортные средства снаружи. Кроме того, возможен вариант маршрутизации вокруг защищенной зоны за счет увеличения трафика за ее пределами.

В исследовании [23] представлена двухуровневая имитационная модель, в которой на нижнем уровне потоки трафика назначаются вновь расширенной сети с учетом теории равновесия пользователей, а верхний уровень определяет, какие каналы следует добавить для достижения максимальной пропускной способности сети. Методология реализуется в тестовой сети, и результаты моделирования подтверждают преимущества использования мощности от использования метода на основе МФД.

2.2 Средства имитационного моделирования транспортного потока

Рассмотрим программные комплексы, предназначенные для имитационного моделирования транспортных потоков [4].

«Компания AnyLogic предоставляет библиотеку дорожного движения Road Traffic Library, позволяющую моделировать транспортные потоки с возможностью наиболее эффективного проектирования и проектирования дорожного движения. Четкая визуализация быстро помогает в разработке: карты плотности подчеркивают заторы, а анимация демонстрирует транспортный поток и узкие места» [19].

Road Traffic Library – это инструмент проектирования дорожного движения и планирования транспорта, предназначенный для моделирования и управления системами дорожного движения. Модели дорожного движения моделируют движение на улицах и автомагистралях, включая перекрестки,

пешеходные переходы, кольцевые развязки, парковки и автобусные остановки (рисунок 8).

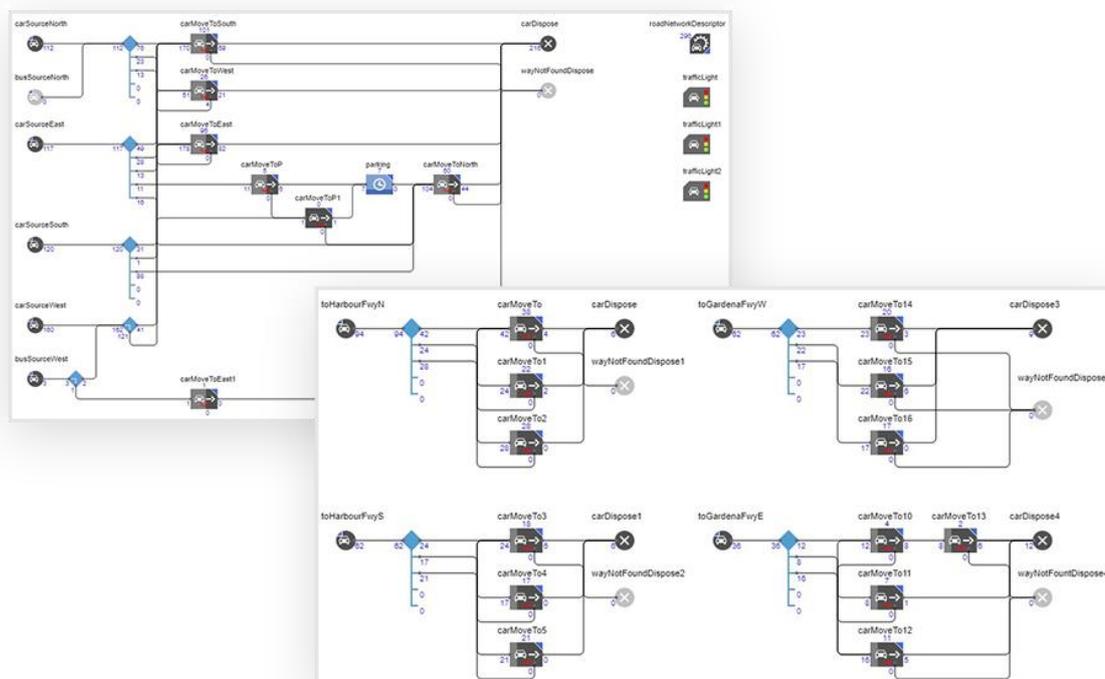


Рисунок 8 – Модель дорожного движения AnyLogic

Модели дорожного движения можно анимировать в 2D и 3D для лучшей визуализации.

Программное обеспечение для моделирования дорожного движения PTV Vissim в цифровом виде воспроизводит схемы движения всех участников дорожного движения в микроскопическом масштабе [17].

С помощью научно обоснованного моделирования и управления сценариями можно оценивать и оптимизировать производительность транспортной инфраструктуры, принимать решения по планированию на основе данных и активно решать такие проблемы, как заторы, выбросы и справедливое распределение дорожного пространства для различных видов транспорта (рисунок 9).

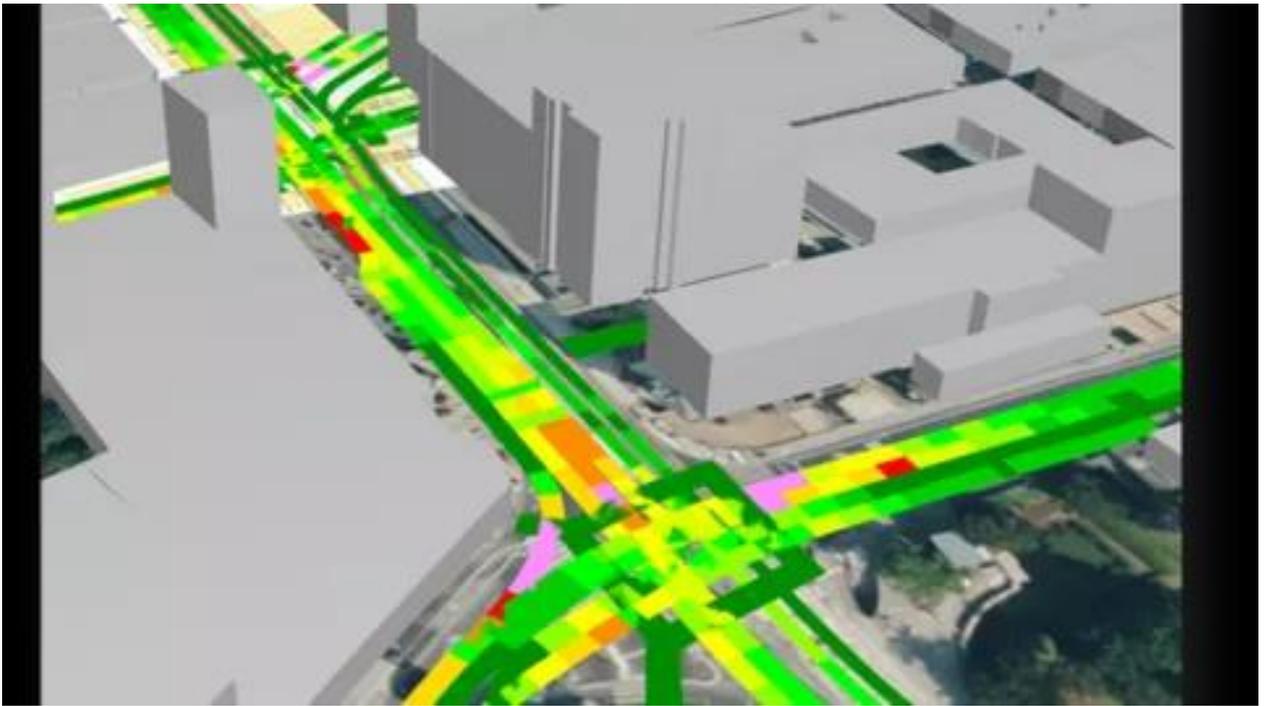


Рисунок 9 – Модель транспортного потока PTV Vissim

PTV Vissim отображает всю дорожную инфраструктуру, логику управления, вплоть до самых передовых процедур управления светофорами и связи Car2X, а также моделирует взаимодействие всех участников дорожного движения на основе интеллектуальных моделей поведения.

Можно интегрировать моделирование в качестве «уровня дорожного движения» в свой цифровой City Twin и обогатить его дополнительными данными, например, зданиями, растительностью, водоемами или данными планирования, такими как предстоящие строительные мероприятия.

Можно определить отдельные сценарии «что, если» и использовать комбинацию мощной оценки транспортных потоков на основе ключевых показателей эффективности с реалистичной 3D-визуализацией, например, для диалогов с заинтересованными сторонами.

Программа MATSim предоставляет фреймворк для реализации крупномасштабного моделирования транспорта на основе агентов [14].

Платформа состоит из нескольких модулей, которые можно

комбинировать или использовать отдельно. Модули можно заменить собственными реализациями для тестирования отдельных аспектов работы пользователя (рисунок 10).

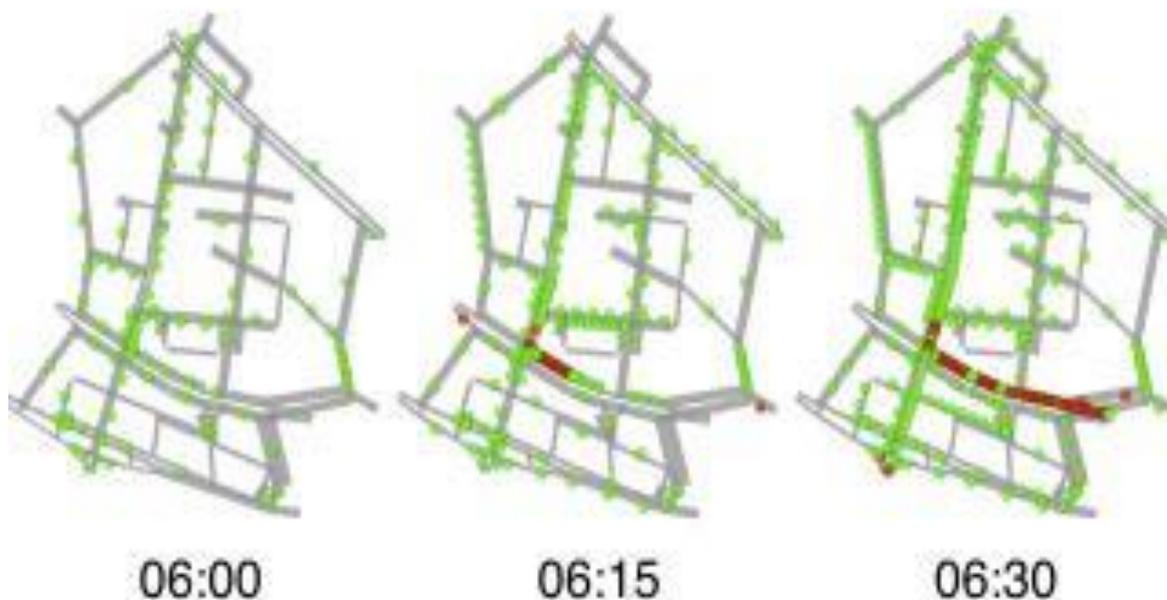


Рисунок 10 – Модели транспортного потока MATSim

В настоящее время MATSim предлагает основу для моделирования спроса, агентного моделирования мобильности (моделирования транспортных потоков), перепланирования, контроллер для итеративного запуска моделирования, а также методы анализа выходных данных, генерируемых модулями.

Для сравнения характеристик рассмотренных программных комплексов составлена таблица 1.

Таблица 1 – Сравнение характеристик программных комплексов для имитационного моделирования транспортного потока

Программный комплекс	Преимущества	Недостатки
AnyLogic	<p>Гибкость: AnyLogic поддерживает несколько парадигм моделирования, включая системную динамику, моделирование дискретных событий и агентное моделирование, – все в рамках одной модели.</p> <p>Простота использования: пользователи ценят простоту навигации и возможность настройки моделирования.</p> <p>Интеграция с Java: благодаря Java в качестве серверной части ваши возможности практически не ограничены, что позволяет создавать сложные модели.</p> <p>Образовательная версия: студенты могут бесплатно использовать ее, что отлично подходит для практики и обучения.</p>	<p>Кривая обучения: программное обеспечение может оказаться трудным для новичков в моделировании и для тех, кто не знаком с Java.</p> <p>Ограниченные возможности бесплатной версии: персональная образовательная версия имеет ограниченные возможности оптимизации.</p> <p>Проблемы с производительностью: некоторые пользователи сообщают об ошибках, низкой производительности и периодических сбоях.</p>
PTV Vissim	<p>Мультимодальное моделирование: PTV Vissim может моделировать различных участников дорожного движения, включая транспортные средства, велосипедистов и пешеходов, обеспечивая комплексное представление о дорожном потоке.</p> <p>Управление уровнем детализации: пользователи могут выбирать уровень детализации своего моделирования, что может сделать процесс более эффективным и позволить моделировать более крупные УДС.</p> <p>Реалистичное моделирование поведения: решение предлагает реалистичное моделирование поведения вождения, в том числе подключенных и автономных транспортных средств, что может иметь решающее значение для планирования и оценки технологий дорожного движения.</p>	<p>Сложность: программное обеспечение может быть сложным, и для его эффективного использования может потребоваться значительный объем обучения и опыта.</p> <p>Ресурсоемкость: высокоточное моделирование может быть дорогостоящим в вычислительном отношении и для бесперебойной работы может потребоваться мощное оборудование.</p> <p>Стоимость: хотя доступна бесплатная академическая лицензия, полная версия программного обеспечения может быть дорогостоящей, что может стать препятствием для некоторых пользователей.</p>

Продолжение таблицы 1

Программный комплекс	Преимущества	Недостатки
MATSim	<p>Открытый исходный код: MATSim находится в свободном доступе, что поощряет сотрудничество и обмен идеями внутри сообщества.</p> <p>Масштабируемость: решение может моделировать крупномасштабные сценарии, что полезно для изучения целых городов или регионов.</p> <p>Гибкость: пользователи могут настраивать и расширять программное обеспечение в соответствии со своими конкретными потребностями.</p> <p>Агентно-ориентированное моделирование: обеспечивает детальное моделирование поведения отдельных агентов, что позволяет получить более детальные результаты моделирования.</p>	<p>Сложность: структура может быть сложной, и для ее эффективного использования пользователям может потребоваться глубокое понимание транспортного моделирования и программирования.</p> <p>Документация: несмотря на обширную документацию, кривая обучения может быть крутой, особенно для новичков в средах моделирования.</p> <p>Требования к вычислениям: моделирование с высокой детализацией может быть ресурсоемким и для эффективной работы может потребоваться значительная вычислительная мощность.</p>

Сравнительный анализ программных комплексов для имитационного моделирования транспортного потока показал, что общим недостатком рассмотренных решений является их сложность и функциональная избыточность.

Выводы к главе 2

Для математического моделирования УДС используется макроскопическая фундаментальная диаграмма транспортного потока.

Недостатком известных программных комплексов для имитационного моделирования транспортного потока является их сложность и функциональная избыточность.

Глава 3 Разработка программы для имитационного моделирования транспортного потока

3.1 Выбор средств разработки программы для имитационного моделирования транспортного потока

Для реализации программы имитационного моделирования выбран язык Python.

Для выбора среды разработки программы сравним характеристики двух сред разработки: Jupyter Notebook и Python IDLE.

Рассмотрим возможности среды Jupyter Notebook [16].

Первоначально Jupyter Notebook был разработан как инструмент для анализа данных и научных вычислений. Он приобрел популярность среди ученых и исследователей данных благодаря своей интерактивной природе и возможности сочетать код, текст и визуализацию в одном документе.

Jupyter Notebook имеет несколько функций, которые делают его популярным инструментом для специалистов по данным и исследователей:

- интерактивный пользовательский интерфейс;
- выполнение кода в режиме онлайн;
- интеграция с несколькими языками программирования;
- легкое сотрудничество и обмен данными;
- визуализация данных и результатов;
- поддержка языка разметки и другие.

Jupyter Notebook имеет ряд преимуществ и недостатков по сравнению с другими IDE, в том числе:

- интерактивное и исследовательское кодирование;
- визуализация и анализ данных в реальном времени;
- зависимость от веб-браузера;
- ресурсоемкий и медленный для больших наборов данных;

- ограниченные инструменты отладки;
- трудности с контролем версий;
- проблемы безопасности при запуске кода из ненадежных источников и другие.

Рассмотрим возможности среды Python IDLE [18].

Python IDLE – интегрированная среда разработки с языком программирования Python и базовым интерфейсом, который позволяет пользователям писать, выполнять и отлаживать код Python.

Python IDLE имеет несколько функций, которые делают его популярным среди начинающих и опытных разработчиков Python:

- базовый пользовательский интерфейс;
- инструменты отладки;
- подсветка синтаксиса;
- автозаполнение и другие.

Преимущества и недостатки среды Python IDLE:

- простота и скорость;
- интегрированные инструменты отладки;
- ограниченные возможности и функциональность;
- нет поддержки совместной работы;
- ограниченная поддержка визуализации данных;
- нет поддержки языка разметки;
- нет интеграции с другими языками программирования.

Для сравнения характеристик рассмотренных сред программирования используем таблицу 2.

Таблица 2 – Сравнение характеристик сред разработки на языке Python

Характеристика	Jupyter Notebook	Python IDLE
Интерфейс	Веб-интерфейс	Десктоп-приложение
Вывод результатов	отображается в строке	в отдельном окне консоли

Продолжение таблицы 2

Характеристика	Jupyter Notebook	Python IDLE
Совместная работа	Встроенная поддержка совместного использования и совместной работы	Нет встроенной функции совместной работы
Организация кода	Код организован в ячейках	Код, записан в одном файле
Отладка	Доступна ограниченная поддержка	Доступна поддержка отладки
Визуализация	Отличная поддержка	Ограниченная поддержка
Кривая обучения	Крутая кривая обучения	Легко изучается
Варианты использования	Интерактивный анализ данных, создание прототипов и визуализация	Написание небольших скриптов и изучение синтаксиса Python

По результатам сравнения и с учетом предпочтений разработчика выбираем среду разработки Jupyter Notebook.

В процессе разработки программы использованы следующие библиотеки языка Python:

- matplotlib. Это комплексная библиотека для создания статических, анимированных и интерактивных визуализаций на Python. Matplotlib делает простые вещи простыми, а сложные – возможными. Matplotlib позволяет создавать графики публикационного качества, интерактивные фигуры, которые можно масштабировать, панорамировать и обновлять, настраивать визуальный стиль и макет программы [1];
- pandas. Это быстрый, мощный, гибкий и простой в использовании инструмент для анализа и обработки данных с открытым исходным кодом, построенный на основе языка программирования Python [2].

Для моделирования транспортного потока используется библиотека UXsim.

UXsim – это бесплатный макроскопический и мезоскопический симулятор потоков сетевого трафика с открытым исходным кодом, написанный на Python.

Он имитирует движения транспорта и пробки в дорожных сетях и

подходит для моделирования крупномасштабных (например, городских) УДС.

Основные возможности:

- простая, легкая и удобная в использовании реализация на Python современных стандартных моделей динамического потока сетевого трафика;
- моделирование транспортных потоков с заданной сетью и зависящим от времени спросом на OD (динамическое распределение трафика);
- внедрение схем контроля/управления дорожным движением, таких как светофоры и ценообразование на дорогах;
- базовый анализ результатов моделирования и их экспорт в файлы `pandas.DataFrame` и CSV;
- визуализация результатов моделирования, включая анимацию;
- гибкость и настраиваемость благодаря чистой реализации на языке Python;
- может быть напрямую интегрирован с другими платформами на основе Python, такими как PyTorch, для управления трафиком с глубоким подкреплением.

Симулятор UXsim особенно полезен для научных и образовательных целей из-за его простых, легких и настраиваемых функций, но, конечно, пользователи могут свободно использовать UXsim для любых целей [22].

3.2 Реализация и тестирование программы для имитационного моделирования транспортного потока

На рисунке 11 показан программный код подключения библиотек языка Python и создания сценария моделирования.

```

1 %matplotlib inline

1 %load_ext autoreload
2 %autoreload 2

1 from uxsim import *
2 import pandas as pd

Определяем тело моделирования W. Единица времени — с (секунда), а единица длины — м.

1 W = World(
2     name="simple_demo",
3     deltan=5,
4     tmax=1200,
5     print_mode=1, save_mode=1, show_mode=1,
6     random_seed=42
7 )

1 Определяем сценарий моделирования (структуру сети и спрос).
2 Добавляем узлы, затем определяем ссылки для соединения узлов и указываем потребность в трафике между узлами.
3 Определяем простую Y-образную сеть слияния.

1 W.addNode("orig1", 0, 0)
2 W.addNode("orig2", 0, 2)
3 W.addNode("merge", 1, 1)
4 W.addNode("dest", 2, 1)
5
6 W.addLink("link1", "orig1", "merge", length=1000, free_flow_speed=20, jam_density=0.2, merge_priority=0.5)
7 W.addLink("link2", "orig2", "merge", length=1000, free_flow_speed=20, jam_density=0.2, merge_priority=2)
8 W.addLink("link3", "merge", "dest", length=1000, free_flow_speed=20, jam_density=0.2)
9
10 W.adddemand("orig1", "dest", 0, 1000, 0.4)
11 W.adddemand("orig2", "dest", 500, 1000, 0.6)

```

Рисунок 11 – Код подключения библиотек языка Python и создания сценария моделирования

На рисунке 12 показан код и результат выполнения симуляции.

```

1 W.exec_simulation()

simulation setting:
scenario name: simple_demo
simulation duration: 1200 s
number of vehicles: 700 veh
total road length: 3000 m
time discret. width: 5 s
platoon size: 5 veh
number of timesteps: 240
number of platoons: 140
number of links: 3
number of nodes: 4
setup time: 0.18 s
simulating...
   time | # of vehicles | ave speed | computation time
   0 s |      0 vehs |    0.0 m/s |      0.00 s
   600 s |     100 vehs |    17.5 m/s |      0.04 s
  1195 s |      25 vehs |    20.0 m/s |      0.06 s
simulation finished

```

Рисунок 12 – Код и результат выполнения симуляции

На рисунке 13 показан код и результат построения МФД

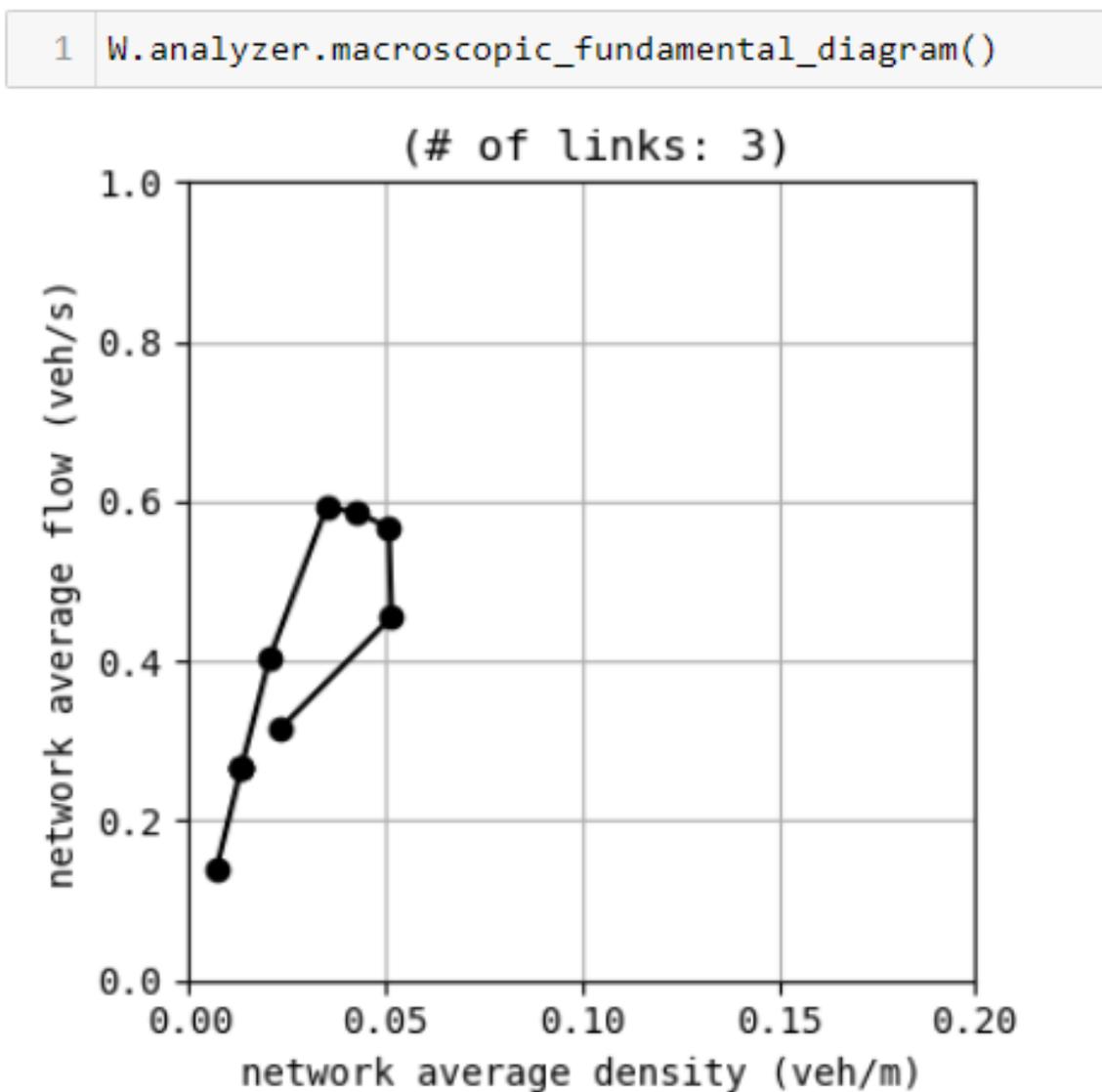


Рисунок 13 – Код и результат построения МФД

На рисунках 14-16 показан код и результаты симуляции Y-образной УДС.

На рисунках t – время моделирования в секундах.

```

1 for t in list(range(0,W.TMAX,int(W.TMAX/6))):
2     W.analyzer.network(t, detailed=0, network_font_size=0, figsize=(4,4))
3 for t in list(range(0,W.TMAX,int(W.TMAX/6))):
4     W.analyzer.network(t, detailed=1, network_font_size=0)

```

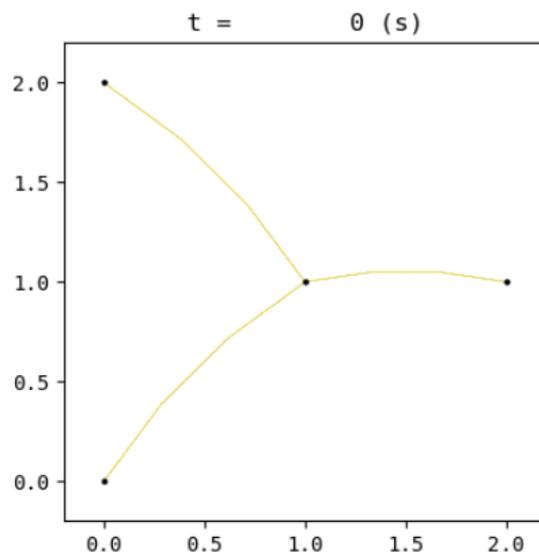


Рисунок 14 – Код и результат симуляции Y-образной УДС

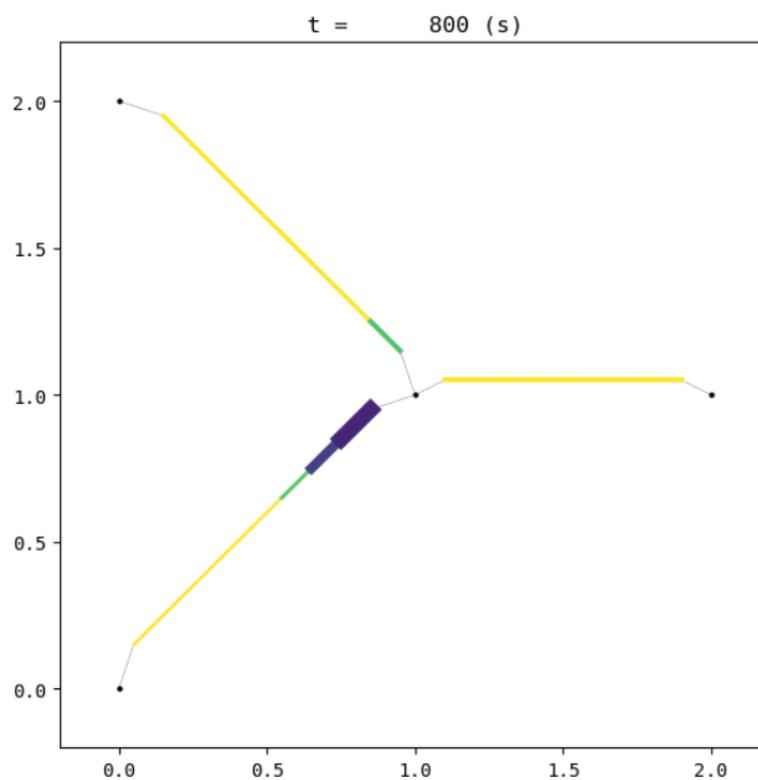


Рисунок 15 – Результат симуляции для t=800 с

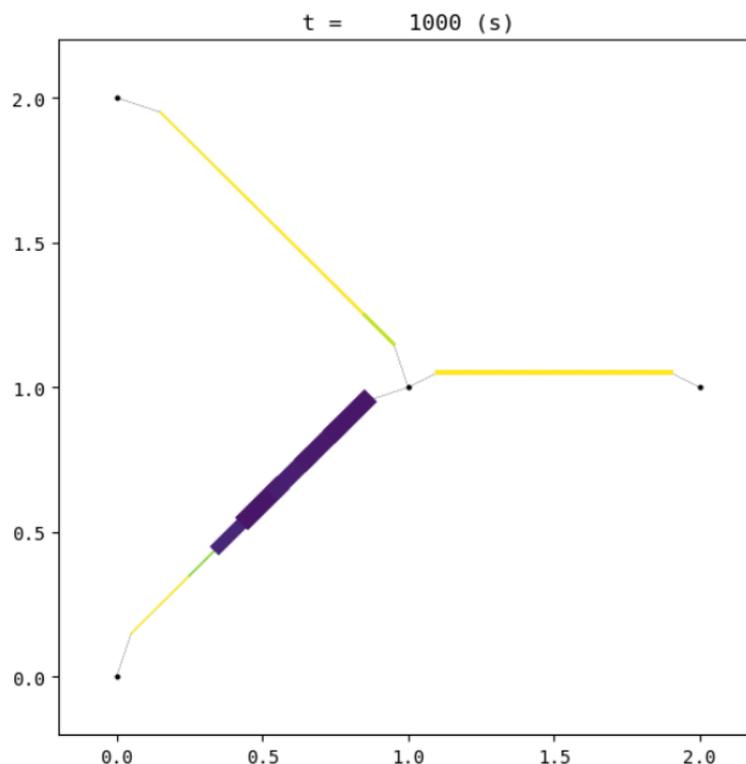


Рисунок 16 – Результат симуляции для $t=1000$ с

Таким образом, разработанная программа позволяет выполнять имитационное моделирование транспортного потока.

Как показали результаты симуляции, построенной с помощью программы МФД позволяет адекватно описывать исследуемые транспортные потоки и проводить на ней вычислительные эксперименты.

Выводы к главе 3

Для разработки программы использованы язык Python и среда разработки Jupyter Notebook.

Как показали результаты симуляции, построенная с помощью программы МФД позволяет адекватно описывать исследуемые транспортные потоки и проводить на ней вычислительные эксперименты.

Заключение

Выпускная квалификационная работа посвящена проблеме моделирования дорожного движения.

Разработка модели дорожного движения, адекватно описывающей исследуемые транспортные потоки, актуальна и представляет научно-практический интерес.

В процессе выполнения бакалаврской работы были решены следующие задачи:

- постановка задачи исследования и анализ методов моделирования дорожного движения. Как показал анализ, задачей теории транспортных потоков является описание точным математическим способом взаимодействия между транспортными средствами, водителями и инфраструктурой. Модели транспортных потоков подразделяются на отдельные классы в зависимости от математических формул, на основе которых они получены, и в целом уровня детализации, которую они обеспечивают. Кривые плотности потока и скорости потока составляют часть, изгибающуюся назад. Состояния движения в области изгиба назад в инженерной литературе называются насыщенными или перегруженными, а в экономической литературе – гиперперегруженными. Имитационное моделирование дорожного движения на компьютерах – это виртуальная копия реальных сценариев дорожного движения, позволяющая получить реалистичное и подробное представление о мультимодальных транспортных потоках;
- обзор и анализ методов и средств имитационного моделирования транспортного потока. Как показал анализ, для математического моделирования УДС используется макроскопическая фундаментальная диаграмма транспортного потока (МФД). Недостатком известных программных комплексов для

имитационного моделирования транспортного потока является их сложность и функциональная избыточность;

- разработка программы для имитационного моделирования транспортного потока. Для разработки программы использованы язык Python и среда разработки Jupyter Notebook. Для моделирования транспортного потока используется библиотека UXsim – бесплатный макроскопический и мезоскопический симулятор потоков сетевого трафика с открытым исходным кодом, написанный на Python. Тестирование показало, что разработанная программа позволяет выполнять имитационное моделирование транспортного потока.

Таким образом, как показали результаты симуляции, построенная МФД позволяет адекватно описывать исследуемые транспортные потоки и проводить на ней вычислительные эксперименты.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Библиотека Matplotlib [Электронный ресурс]. URL: <https://matplotlib.org/> (дата обращения: 30.04.2024).
2. Библиотека Pandas [Электронный ресурс]. URL: <https://pandas.pydata.org/> (дата обращения: 30.04.2024).
3. Ерещенко Т. В., Рашевский Н. М., Хорошун Д. А., Курамшин Р. Ф., Ряпалов Д. Н. Анализ и моделирование транспортных потоков на перекрестке для управления качеством городской среды // ИВД. 2022. №8 (92). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-modelirovanie-transportnyh-potokov-na-perekrestke-dlya-upravleniya-kachestvom-gorodskoy-sredy> (дата обращения: 28.04.2024).
4. Задорожный В. Н., Юдин Е. Б. Обзор программ моделирования транспортных потоков // ОмГТУ. 2012. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-programm-modelirovaniya-transportnyh-potokov> (дата обращения: 29.04.2024).
5. Мартынова И. В., Ершов Н. М. Имитационное моделирование дорожного трафика с помощью сетей Петри. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-1787/546-551-paper-95.pdf> (дата обращения: 27.04.2024).
6. Моделирование транспортных потоков [Электронный ресурс]. URL: <https://itr.spb.ru/mtp> (дата обращения: 27.04.2024).
7. Семенов В. В. Математическое моделирование транспортного потока на нерегулируемом пересечении // Матем. моделирование, 2008, том 20, номер 10, 14–22.
8. Улично-дорожная сеть, схемы, характеристики [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/7757933/page:7/> (дата обращения: 27.04.2024).
9. Anupriya and Bansal, Prateek and Graham, Daniel J., Analytical Representations of the Fundamental Diagram of Traffic Flow for Highways: A Review of Theory and Empirics (May 24, 2022). URL:

<https://ssrn.com/abstract=4118719>.

10. Levinson D. et al. Traffic Flow. URL: https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Civil_Engineering/Fundamentals_of_Transportation/05%3A_Traffic/5.02%3A_Traffic_Flow (дата обращения: 27.04.2024).

11. Li J., Zhang H. M. Fundamental Diagram of Traffic Flow, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2260, 2011, pp. 50–59.

12. Lieu H. Traffic-Flow Theory. URL: <https://highways.dot.gov/public-roads/janfeb-1999/traffic-flow-theory> (дата обращения: 27.04.2024).

13. Macroscopic fundamental diagram. URL: <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Chapter-11-Macroscopic-fundamental-diagram.pdf> (дата обращения: 27.04.2024).

14. MATSim Multi-Agent Transport Simulation [Электронный ресурс]. URL: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.matsim.org/> (дата обращения: 29.04.2024).

15. Melnikov V.R. et al. Data-driven Modeling of Transportation Systems and Traffic Data Analysis During a Major Power Outage in the Netherlands, Procedia Computer Science, Volume 66, 2015, P. 336-345.

16. Project Jupyter [Электронный ресурс]. URL: <https://jupyter.org/> (дата обращения: 30.04.2024).

17. PTV Vissim [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ptvgroup.com/en/about/company-profile> (дата обращения: 29.04.2024).

18. Python IDLE [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.python.org/3/library/idle.html> (дата обращения: 30.04.2024).

19. Road Traffic Library [Электронный ресурс]. URL: <https://www.anylogic.com/features/libraries/road-traffic-library/> (дата обращения: 29.04.2024).

20. Storani F. Analysis and comparison of traffic flow models: a new hybrid traffic flow model vs benchmark models, European Transport Research Review

(2021). URL: <https://etrr.springeropen.com/articles/10.1186/s12544-021-00515-0>
(дата обращения: 29.04.2024).

21. Tadeusiak M. Traffic Flow Modelling conceptual model and specific implementations. URL: https://warwick.ac.uk/fac/cross_fac/complexity/study/emmc/outcomes/studentprojects/tadeusiak.pdf (дата обращения: 27.04.2024).

22. UXsim: Network traffic flow simulator in pure Python [Электронный ресурс]. URL: <https://pypi.org/project/uxsim/1.0.9/> (дата обращения: 27.04.2024).

23. Whalin R.W. Macroscopic Fundamental Diagram Approach to Traffic Flow with Autonomous/Connected Vehicles. URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/57432/dot_57432_DS1.pdf (дата обращения: 27.04.2024).

24. Why Would You Use a Traffic Simulation? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ptvgroup.com/en/application-areas/traffic-simulation> (дата обращения: 27.04.2024).

25. Write short note on: Advantages and Disadvantages of Simulation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ques10.com/p/22509/write-short-note-on-advantages-and-disadvantages-1/> (дата обращения: 27.04.2024).