

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донецкий национальный технический университет»

На правах рукописи

Стрижко Михаил Александрович

УДК 656.11:004.89(043)

**МОДИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫМИ
ПОТОКАМИ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКАХ НА ОСНОВЕ
СРЕДСТВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (технические науки)

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Червинский В. В.

Донецк – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ АВТОТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКАХ	13
1.1 Существующие системы светофорного регулирования	13
1.1.1 Классификация методов управления автотранспортными потоками	14
1.1.2 Системы адаптивного управления автотранспортными потоками	16
1.2 Концепции построения интеллектуальных систем управления автотранспортными потоками	19
1.2.1 Нейросетевые подходы к управлению автотранспортными потоками	19
1.2.2 Системы управления, основанные на нечеткой логике	20
1.3 Обзор существующих моделей движения автотранспортных потоков	22
1.4 Обзор технических средств систем управления автотранспортными потоками	23
1.4.1 Детекторы транспорта	24
1.4.2 Технологии передачи данных и «облачных» вычислений	25
1.5 Постановка цели и задач исследования	26
1.6 Выводы по разделу 1	27
РАЗДЕЛ 2 МОДИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ АВТОТРАФИКА С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ СО СМЕЖНЫХ ПЕРЕКРЕСТКОВ	28
2.1 Анализ моделей задержки транспортных средств М. Дж. Бэкманна и Ф. В. Вебстера	28

2.2 Сбор эмпирических данных по параметрам автотранспортных потоков на отдельных перекрестках	31
2.2.1 Планирование эксперимента	31
2.2.2 Исследование суточной и недельной неравномерности автотранспортного потока	36
2.3 Исследование адекватности моделей задержки ТС М. Дж. Бэкманна и Ф. В. Вебстера	38
2.4 Исследование применимости модели задержки ТС М. Дж. Бэкманна при моделировании сети перекрёстков	45
2.4.1 Сбор эмпирических данных по параметрам автотранспортных потоков на взаимосвязанных перекрестках	47
2.4.2 Разработка модификации модели задержки ТС М. Дж. Бэкманна для взаимосвязанных перекрестков	49
2.5 Выводы по разделу 2	57
РАЗДЕЛ 3 МОДИФИКАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКАХ	59
3.1 Структурная схема системы управления	59
3.2 Разработка алгоритма управления на основе нечеткой логики	62
3.2.1 Определение параметров системы управления	67
3.2.2 Разработка подсистем управления включением фазы регулирования для безопасного левого поворота	70
3.3 Моделирование и анализ качества управления	76
3.4 Разработка алгоритма прогнозирования трафика на основе нейросети	85
3.4.1 Типизация участков дорожной сети для прогнозирования трафика	87
3.4.2 Определение параметров нейронной сети	90
3.4.3 Обучение нейронной сети	94
3.4.4 Оценка качества управления системы с использованием прогнозных данных о трафике	96

3.5 Разработка рекомендаций по практическому использованию предложенных решений	97
3.6 Разработка библиотеки специализированных программных модулей на языке Structured Text	101
3.7 Выводы по разделу 3	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	114
Приложение А Нечеткие правила системы управления автотранспортными потоками	126
Приложение Б Результаты моделирования работы системы управления с полной информацией об объекте	130
Приложение В Результаты моделирования работы системы управления с использованием нейросетевого прогнозирования трафика	133
Приложение Г Документы, подтверждающие эффективность использования результатов работы	135

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

2G – второе поколение сотовой связи;

3G – третье поколение сотовой связи;

4G – четвертое поколение сотовой связи;

5G – пятое поколение сотовой связи;

АСУДД – автоматизированная система управления дорожным движением;

ГИБДД – Государственная инспекция безопасности дорожного движения;

ДТ – детектор транспорта;

ИТС – интеллектуальная транспортная система;

НС – нейронная сеть;

ПДД – правила дорожного движения;

ПЛК – программируемый логический контроллер;

ТС – транспортное средство;

УДС – улично-дорожная сеть;

ФБ – функциональный блок;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

DO (discrete output) – дискретный выход;

HMI (human machine interface) – человеко-машинный интерфейс;

IoT (Internet of things) – Интернет вещей;

ST (structured text) – структурированный текст.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Рост автомобильного парка и объема перевозок ведёт к снижению эффективности использования транспорта: вследствие более частых и продолжительных остановок на перекрестках увеличивается время автомобилей в пути, повышается износ комплектующих и расход топлива, что сопровождается загрязнением окружающей среды. Для минимизации данных явлений применяются различные методы, среди которых: расширение проезжей части, увеличение количества полос движения, строительство новых дорог, а также повышение качества регулирования перекрестков. При этом следует отметить, что реализация первых трех способов в большинстве случаев затруднительна ввиду плотности городской застройки. С учетом динамически изменяющейся интенсивности дорожного движения имеет место недостаточная координация управления трафиком на соседних светофорных объектах, вследствие чего автотранспортные средства простаивают на перекрестках в ожидании разрешающего сигнала светофора в то время, когда трафик в конфликтующем направлении отсутствует. Таким образом, переключение сигналов светофоров в «жестком» режиме (с фиксированными длительностями фаз) на перекрестках с высокой динамикой интенсивности движения не обеспечивает необходимой эффективности регулирования. Современные методы интеллектуального управления, технологии «умного» города и Интернета вещей в рамках концепции Industry 4.0 открывают новые возможности для гибкого и координированного управления дорожным движением, его связи с другими сферами жизни города.

Таким образом, повышение эффективности светофорного регулирования перекрестков на основе современных средств автоматизации, интеллектуальных методов управления, а также технологий Интернета вещей и «умного» города является актуальной задачей, имеющей большое значение для управления

автотранспортными потоками в условиях постоянного увеличения их интенсивности.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время оптимизации регулирования дорожного движения посвящено достаточно большое количество научных работ, среди которых труды отечественных исследователей: Г. Д. Антониади, А. А. Шинкарева, Д. С. Жамангарина, Е. И. Исаевой, А. А. Кураксина; и зарубежных: Дж. Харди, А. Эль-Мудхаффар, Я. Нииттимаки, М. Газанфари, Т. К. Кьянг. Предметом исследования в данных работах являются методы «гибкого» управления автотранспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием. Управление трафиком при помощи данных методов осуществляется посредством приращения длительности фаз регулирования. Однако, такие системы управления зачастую нечувствительны к микроколебаниям транспортного потока и обеспечивают недостаточно высокое качество управления. Модели описания транспортных потоков, используемые в данных работах, дают адекватные результаты не во всех режимах движения транспорта, особенно при учете его потоков со стороны смежных перекрестков.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в соответствии с тематическим планом ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»: ГТ № Н 2024-2 «Метод интеллектуального управления для регулирования транспортных потоков».

Цель и задачи исследования. Целью работы является совершенствование системы управления автотранспортными потоками путем научного обоснования структуры и параметров применяемых математических моделей описания трафика и модификации метода интеллектуального управления с использованием принципов нечеткой логики и нейросетевого прогнозирования для повышения эффективности управления потоками автотранспортных средств при проезде регулируемых перекрестков.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие основные задачи:

1. Выполнить анализ существующих систем управления дорожным движением и моделей описания трафика, а также перспектив их развития с учетом возможностей современных технических средств.

2. Выполнить теоретические исследования и модификацию математических моделей автотрафика для применения как на отдельных, так и на взаимосвязанных перекрестках.

3. Разработать средства совершенствования системы светофорного регулирования перекрестков на базе интеллектуальных методов управления с привлечением технологий Интернета вещей и «умного» города и рекомендации по практическому использованию предложенных решений.

Объект исследования: автотранспортные потоки на улично-дорожных сетях со светофорным регулированием.

Предмет исследования: методы интеллектуального управления потоками автотранспортных средств на перекрестках со светофорным регулированием.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Получили дальнейшее развитие математические модели описания автотранспортных потоков в условиях светофорного регулирования, отличающиеся от существующих учетом взаимного влияния параметров транспортных потоков, пересекающих регулируемый и смежные перекрестки, что позволило повысить точность моделирования процесса движения транспортных средств.

2. Впервые предложено при нечетком управлении автотранспортными потоками на регулируемых перекрестках формировать управляющий вектор сигналов светофоров на основании интеллектуальной оценки целесообразности смены фазы регулирования, что позволяет приблизить логику работы системы к действиям эксперта-регулирущика.

3. Впервые обоснован метод нейросетевого прогнозирования параметров трафика в «слепых» зонах на участках автомобильных дорог при нечетком управлении движением транспортных средств, улучшающий качественные показатели обслуживания трафика.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии существующих моделей движения автотранспортных потоков через перекрестки, учитывающих дополнительные их параметры, а также в развитии интеллектуальных методов управления светофорным регулированием на основе полученных моделей с использованием методов нечетких множеств и нейросетевого прогнозирования, а также технологий Интернета вещей и «умного» города.

Практическая значимость работы:

1. Разработанный программный комплекс по моделированию автотранспортных потоков на перекрестках для различных схем фиксированного и интеллектуального управления позволяет оценить качество регулирования перекрестков при разработке интеллектуальных методов управления автотранспортными потоками.

2. Разработанные рекомендации по технической реализации системы управления на базе технологий «умного» города и современных средств автоматизации и управления позволяют адаптировать использование системы к условиям конкретного города в зависимости от степени освоения технологий Интернета вещей и «облачных» вычислений.

3. Разработанная библиотека программных модулей отдельных компонентов предложенной системы интеллектуального управления на языке Structured Text позволяет реализовать прикладные программы на контроллерах, устанавливаемых для светофорного регулирования перекрестков различных типов.

Полученные результаты могут быть использованы научно-исследовательскими, проектными организациями, службами обеспечения безопасности дорожного движения. Практическая реализация результатов работы подтверждается справкой о практическом применении в Администрации городского округа Донецк Донецкой Народной Республики (справка № М0-555/01-03-14 от 21.01.2025), справкой о внедрении в учебный процесс ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» (справка № 30-12/2 от 21.01.2025). Разработан лабораторный стенд для проверки результатов

исследований, тестирования систем управления транспортными потоками и выполнения лабораторных занятий со студентами.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы, основанные на положениях теории массового обслуживания, теории нечетких множеств и нейронных сетей, методы анализа результатов эксперимента, математического и имитационного моделирования.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что учет эмпирической взаимозависимости параметров автотранспортных потоков на смежных перекрестках повышает адекватность математической модели задержки транспортных средств М. Дж. Бэкманна, используемой при моделировании транспортных процессов, давая расхождение модельных и экспериментальных данных в пределах 5 %, в том числе для условий неравномерности транспортных потоков с соседних перекрестков.

2. Показано, что модификация управляющего вектора сигналов светофоров на основании оценки целесообразности смены фазы регулирования по нечетким правилам с заложенным в них опытом эксперта-регулирущика при интеллектуальном управлении автотранспортными потоками позволяет улучшить показатели качества проезда перекрестков в среднем на 39 % по сравнению с «жестким» управлением и в среднем на 13 % по сравнению с существующими системами интеллектуального управления.

Степень достоверности и апробация результатов. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью формулировки математического описания задачи и результатами математического моделирования при решении задач в компьютерной среде с применением специализированного программного обеспечения.

По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов, существу полученных результатов диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки), в частности: п. 5 «Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем

автоматизированного управления технологическими объектами»; п. 6 «Научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами»; п. 7 «Теоретические основы и методы моделирования и управления организационно-технологическими системами и киберфизическими производственными комплексами»; п. 9 «Методы совместного проектирования организационно-технологических централизованных и распределенных комплексов и систем управления ими».

Основные положения диссертационной работы апробированы на научно-технических конференциях: XXII Международная научно-техническая конференция «Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых» в рамках 8-го Международного научного форума «Инновационные перспективы Донбасса», ДонНТУ, г. Донецк, 24–26 мая 2022 г.; IX Международная научно-практическая конференция «Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта» в рамках IX Международного Научного форума Донецкой Народной Республики «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие», ДонИЖТ, г. Донецк, 24–25 мая 2023 г.; IX Международная научно-практическая конференция «Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса» (заочно-дистанционная) в рамках 9-го Международного научного форума Донецкой Народной Республики, АДИ ДонНТУ, г. Горловка, 25 мая 2023 г.

Личный вклад соискателя. Все результаты и положения, составляющие основное содержание диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и ее реализации, цели и задач работы, в выборе методов и направлений исследований, выполнении теоретических, аналитических и экспериментальных исследований, разработке положений и методических рекомендаций по использованию результатов работы.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 8 научных работах, из них 5 – в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты

диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утверждённый ВАК РФ; 3 – в материалах и тезисах конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит 137 страниц машинописного текста и состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы из 101 источника на 12 страницах и 4 приложений на 12 страницах. Основной текст, изложенный на 108 страницах, иллюстрируется 54 рисунками и содержит 14 таблиц.

РАЗДЕЛ 1**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ
АВТОТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ
ПЕРЕКРЕСТКАХ****1.1 Существующие системы светофорного регулирования**

Применение технических средств регулирования движения на автомобильных дорогах берет начало в 1868 году [1]. Принцип действия таких устройств позаимствован из железнодорожного транспорта. Сигнал, подаваемый устройством регулирования, определялся положением стрелок, а управление осуществлялось регулировщиком вручную. В 1912 году разработано первое электрическое устройство с красным и зеленым световыми сигналами. В 1920 году оно дополнено желтым сигналом, по принципу действия став тем самым светофором на автомобильных дорогах, который используется в наши дни. В первое время использования светофоров управление по-прежнему осуществлялось в ручном режиме сотрудниками полиции в специальных постовых будках [2]. Позднее переключение сигналов стало производиться при помощи реле, а затем и с применением микропроцессорной техники. В 1960-х годах появились первые централизованные системы автоматического управления светофорами [3], а также возможность управления светофором пешеходами при помощи специальной кнопки на пешеходном переходе.

Процесс современного светофорного регулирования описывается такими понятиями как такт регулирования – период действия определенной комбинации сигналов светофора (бывают основные и промежуточные); фаза регулирования – сочетание основного и следующего за ним промежуточного тактов; цикл регулирования – последовательность всех фаз светофорного регулирования на перекрестке, которая периодически повторяется [4].

1.1.1 Классификация методов управления автотранспортными потоками

Существующие методы организации управления автотранспортными потоками посредством светофорного регулирования можно разделить по пространственному и временному критериям [2, с. 10]. По пространственному критерию выделяется локальное и сетевое управление [5].

При локальном управлении расчет режима регулирования на перекрестке основывается на показателях интенсивности транспортных потоков в зоне перекрестка, на стоп-линиях или на небольшом расстоянии на подъезде к перекрестку. Локальное управление на сегодняшний день используется на перекрестках с невысокой интенсивностью движения, а также значительно удаленных от других светофорных объектов.

При сетевом управлении расчет режима регулирования производится не на каждом перекрестке в отдельности, а одновременно на нескольких соседних перекрестках. Такое управление применяется, когда интенсивность движения между перекрестками достаточно высока, при малом расстоянии между ними (до 600 м). При сетевом управлении перекрестки улично-дорожной сети обычно распределяются по зонам, а длительности фаз и сдвиги регулирования определяются для всех светофорных объектов зоны.

По временному критерию можно выделить прогнозное, ситуационное и адаптивное управление.

Прогнозное управление, также называемое «жестким», осуществляется по заранее написанной программе на основании ранее собранных статистических данных об интенсивности транспортного потока и времени движения ТС через перекресток.

Ситуационное управление заключается в составлении различных программ управления для каждой ситуации на перекрестке, определяемой интенсивностью движения в каждом из направлений, и включении наиболее подходящей программы в ручном или автоматическом режиме.

Адаптивное управление осуществляется исходя из ситуации на перекрестке в реальном времени или на основании краткосрочного прогноза (до 15 мин). Данный метод управления для оценки дорожной обстановки предполагает наличие технических средств обнаружения трафика на подъездах к перекрестку.

Допускаются любые сочетания управления по пространственному и временному критериям. Программное, ситуационное или адаптивное управление может быть как локальным, так и сетевым.

С учетом приведенной классификации методов управления светофорными объектами выделяются следующие режимы управления.

Диспетчерский режим. Осуществляется сотрудником службы безопасности дорожного движения удаленно. Например, на основании информации с видеокамер диспетчер может выбирать ту или иную программу ситуационного управления, что особенно актуально для ситуаций, связанных с дорожными происшествиями, проездом спецтехники или городскими мероприятиями. В условиях современных мегаполисов, где количество светофорных объектов очень велико, применение данного режима управления на постоянной основе требует большого количества сотрудников, а следовательно, ведет к трудовым и финансовым затратам.

Программный режим. Регулирование в данном режиме осуществляется полностью автоматически. Ситуационные программы выбираются по времени суток, дню недели и времени года исходя из статистических наблюдений о периодичности изменения параметров потоков на перекрестке. Составление большого количества ситуационных программ и более детальное разделение дорожной обстановки на различные ситуации позволяет повысить качество управления, однако сбор статистики является достаточно трудоемким и финансово затратным процессом. Помимо этого, дорожные ситуации, определенные для периода суток или дня недели, с течением времени могут меняться, что требует постоянной актуализации программ и регулярных наблюдений. В то же время программный режим работы светофоров на сегодняшний день остается наиболее распространенным.

Координированный режим. Параметры регулирования на перекрестке выбираются на основании параметров регулирования соседних светофорных объектов, входящих в одну зону, для включения разрешающего сигнала с определенным временным сдвигом по отношению к ним, что позволяет ТС проехать зону координированного управления без остановок или с минимальным временем ожидания [6]. Величина сдвига определяется исходя из скорости движения ТС на участке дорожной сети между перекрестками в прямом и обратном направлении, а также расстояния между ними. Координированный режим позволяет реализовать различные алгоритмы управления в зависимости от поставленных задач: «зеленая волна» – применяется для достижения безостановочного проезда ТС в зоне координированного управления при движении с определенной скоростью; «красная волна» – применяется для ограничения скорости на определенных участках дорожной сети или при необходимости остановки. Координированный режим довольно часто применяется при управлении движением через несколько перекрестков, однако он эффективен только при определенной скорости транспортного потока, которая может изменяться в зависимости от загруженности дорожной сети.

Адаптивный режим. Параметры регулирования автоматически выбираются в реальном времени на основании текущей информации о транспортном потоке, поступающей с детекторов транспорта.

1.1.2 Системы адаптивного управления автотранспортными потоками

Системам адаптивного управления автотранспортными потоками посвящены работы отечественных исследователей [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17] и зарубежных [18, 19, 20, 21, 22, 23]. При реализации подобных систем применяются различные алгоритмы управления, среди которых можно выделить следующие:

- алгоритмы, реализующие перераспределение фаз в течение цикла регулирования на основании данных с детекторов транспорта;

- алгоритмы, основанные на статистической оптимизации – на основе информации с детекторов транспорта формируют вероятностный прогноз регулирования на следующий цикл;

- алгоритмы случайного поиска – предполагают случайное изменение параметров регулирования и одновременную оценку критерия эффективности (например, длины очереди или задержки);

- алгоритм поиска разрыва в транспортном потоке в направлении действия разрешающего сигнала – предусматривает продление текущей разрешающей фазы регулирования, пока к перекрестку непрерывно прибывают транспортные средства, или до тех пор, пока не истечет максимально допустимое время действия фазы регулирования;

- алгоритм сравнения транспортной задержки в конфликтующих направлениях – распределяет фазы регулирования в течение цикла обратно пропорционально средней задержке ТС по направлениям для достижения минимальной средней задержки ТС по перекрестку;

- алгоритм пропуска очередей – работает таким образом, что разрешающая фаза регулирования заканчивается сразу после того, как все ТС покинут очередь в данном направлении [3, с. 77].

Далее приведено краткое описание наиболее известных и применяемых на практике систем адаптивного управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием.

Немецкая система BALANCE реализует сетевое адаптивное управление и направлена на повышение эффективности координированной работы светофорных объектов. Анализирует параметры транспортного потока каждые 5 минут и определяет режим регулирования на следующий период [24]. Не учитывает микроколебания интенсивности движения, однако допускает дополнительную настройку длительностей фаз на уровне локальных контроллеров.

Система MOTION также разработана в Германии. Её работа основана на моделировании транспортных потоков в реальном времени и дальнейшем выборе наиболее подходящих параметров регулирования [25, 26]. В качестве критерия

оптимизации производитель указывает загрязнение окружающей среды. Интервал изменения параметров регулирования составляет 5–15 мин.

Система OPAC, описанная в работах [27, 28, 29], применяется в США и Канаде. Использует формулы расчета вероятности заторов и выбирает соответствующие параметры регулирования для недопущения очередей на изолированных перекрестках. Стоит отметить, что данная система эффективнее работает при относительно свободном движении и показывает снижение эффективности при уже сформировавшихся «пробках».

Система SCATS разработана в Австралии. Её разработке и модификациям посвящены публикации [30, 31]. Данная система предусматривает перераспределение длительностей фаз внутри цикла регулирования в пределах установленных ограничений с целью минимизации задержки ТС. Время, сэкономленное в результате сокращения фаз, разрешающих движение во второстепенных направлениях, увеличивает длительность разрешающей фазы в основном направлении, а длительность цикла остаётся постоянной. Интервал изменения параметров регулирования равен длительности цикла.

Британская система SCOOT описана в [32, 33, 34]. Она позволяет изменять длительности фаз и цикла, а также сдвиги регулирования между соседними светофорными объектами с целью минимизации задержки ТС. Так как разработка системы началась ещё в 70-е годы, алгоритм её работы предполагает использование индуктивных детекторов транспорта, которые встраиваются в дорожное полотно, хотя на сегодняшний день существуют более эффективные и надежные способы отслеживания транспортного потока. Изменение длительностей фаз регулирования возможно с интервалом, равным длительности цикла, которая, в свою очередь, рассчитывается каждые 5 мин [2, с. 24].

Исходя из приведенного описания, можно резюмировать, что существующие системы адаптивного управления транспортными потоками в большинстве своем на основании статистических данных о трафике устанавливают параметры регулирования, которые обновляются каждые 5–15 мин. Таким образом, описанные системы могут не учитывать микроколебания и разрывы транспортного

потока, которые можно использовать для пропуска ТС в конфликтующих направлениях. Данные системы адаптивного управления, как правило, основываются на модели объекта, предполагая, что она достаточно точно описывает его поведение. Однако, при огромном многообразии светофорных объектов с различными условиями движения в городе и широком диапазоне характеристик транспортных потоков построение адекватной и, что немаловажно, универсальной модели, применимой для большинства светофорных объектов в городе, является крайне сложной задачей.

1.2 Концепции построения интеллектуальных систем управления автотранспортными потоками

Сложность взаимодействия автотранспортных потоков, высокая динамика интенсивности трафика и большое количество факторов, влияющих на характер движения ТС на перекрестках со светофорным регулированием, снижают качество управления транспортными потоками как традиционными методами управления с применением заранее составленной программы регулирования, так и методами, основанными на обратной связи. В связи с этим актуальным является применение интеллектуальных методов, которые позволяют повысить качество управления в условиях высокой неопределенности информации об объекте. Среди систем интеллектуального управления транспортными потоками в литературе наиболее часто встречаются разработки на основе нейронных сетей [35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44] и нечеткой логики [45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54].

1.2.1 Нейросетевые подходы к управлению автотранспортными потоками

В работах тайваньского ученого Куэй Сян Чао [55, 56] описана концепция системы интеллектуального управления, основанной на применении нейронных сетей. Дорожная ситуация при этом описывается одним из 9 состояний по уровню

загруженности основного и второстепенного направлений. На входы нейросети поступают данные об актуальности той или иной ситуации на перекрестке в текущий момент, на основании чего система управления принимает решение о длительности разрешающей фазы регулирования в каждом направлении.

О. П. Тимофеева в своих работах [57, 58] описывает применение нейросетей для решения комбинированной задачи классификации и оптимизации. Таким образом, текущая ситуация на перекрестке классифицируется также с использованием нейронной сети, а в результате решения задачи оптимизации определяется фаза регулирования, включение которой наиболее целесообразно в данных условиях. Оценка дорожных условий производится с шагом, равным 10 с.

Нейронные сети показывают высокую эффективность при регулировании движения на отдельном перекрестке, однако массовая реализация данного метода для большого количества отдельных перекрестков предполагает индивидуальное обучение нейросети на каждом объекте, что требует большого объема вычислительных ресурсов.

1.2.2 Системы управления, основанные на нечеткой логике

Одним из известных решений для управления транспортными потоками, основанных на нечеткой логике, является разработка финских ученых из Хельсинского технологического университета под руководством Яркко Нииттимаки [59, 60]. Детекторы транспорта на проезжей части устанавливаются на расстоянии 40–100 м до стоп-линии в каждом направлении движения. На основе информации, полученной от детекторов транспорта, происходит оценка количества транспортных средств, приближающихся к перекрестку.

При использовании нечеткой логики механизм логического вывода системы управления напоминает процесс рассуждения человека [61]. Например, если транспорт на перекрестке будет регулировать сотрудник полиции, то он может руководствоваться с следующими соображениями: ЕСЛИ машин С СЕВЕРА МНОГО И машин С ВОСТОКА МАЛО, ТО пропускать поток С СЕВЕРА ДОЛГО.

В другом случае он может решить: ЕСЛИ машин С СЕВЕРА СРЕДНЕ И машин С ВОСТОКА СРЕДНЕ, ТО пропускать поток С СЕВЕРА СРЕДНЕ.

В системе нечеткого логического вывода Нииттимаки два входных сигнала: А (количество ТС, приближающихся к перекрестку на зеленый сигнал) и Q (количество ТС, стоящих в очереди на красный сигнал), на основании которых определяется время продления зеленого сигнала (выходная переменная). Решение о продлении зеленого сигнала (или завершении разрешающей фазы регулирования) принимается по окончании предыдущего добавочного времени. Текущая разрешающая фаза завершается, если значение добавочного времени на выходе системы равно нулю или когда достигнуто максимальное количество продлений для одной фазы, которое в системе равно 5. Значение количества ТС, поступающее на входы системы, описывается тремя термами: «Мало» (*S*), «Средне» (*M*), «Много» (*B*). Время продления текущей фазы регулирования на выходе системы описывается тремя термами: «Короткое» (*S*), «Среднее» (*M*), «Долгое» (*L*). Решение о размере приращения текущей фазы регулирования принимается на основе нечетких правил.

Китайский исследователь Ян Чжиган описывает в статье [62] иерархическую систему нечеткого управления транспортными потоками. Предложенная им система содержит два уровня управления на основе нечеткой логики. Первый уровень определяет длительность следующего цикла регулирования на основе текущей интенсивности транспортного потока. На втором уровне принимается решение о продлении текущей разрешающей фазы. Данный подход реализует алгоритм перераспределения фаз в течение цикла, который имеет ограничения, связанные с длительностью цикла, в отличие от других методов «гибкого» управления.

Управление, основанное на нечеткой логике, позволяет разработать универсальное решение для большинства светофорных объектов с незначительной настройкой или совсем без неё, что снижает требования к ресурсам и упрощает реализацию системы. Описанное выше решение позволяет реализовать достаточно гибкое управление и оптимизировать работу светофорных объектов, однако имеет

ограничения, связанные с заблаговременным продлением текущей фазы регулирования. Так, если принято решение о продлении зеленого сигнала на максимально возможный период, в течение этого времени работа системы не поддается корректировке. Также в системе невозможно отслеживание ТС непосредственно перед стоп-линией для более оперативного реагирования на изменение дорожной ситуации.

1.3 Обзор существующих моделей движения автотранспортных потоков

Разработка систем управления автотранспортными потоками предполагает наличие критериев оценки эффективности их работы для проверки и сравнения различных решений. Многие методы «гибкого» управления основаны на использовании математического описания транспортных потоков. Вопросам моделирования автотрафика посвящены исследования [63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72]. Отдельно следует выделить работы, посвященные моделированию с использованием прогнозных данных [73, 74, 75, 76]. Стоит отметить, что системы светофорного регулирования по принципу действия являются частным случаем систем массового обслуживания с очередями [77]. Одним из основных показателей качества систем массового обслуживания с очередями принято считать среднее время ожидания, которое применительно к транспортным потокам обычно называется средним временем задержки ТС на перекрестке. В связи с этим необходимым является получение адекватной математической модели задержки ТС в течение цикла регулирования, которая позволит оценить влияние управляющих воздействий системы на объект управления на основе параметров регулирования и транспортного потока.

Существуют различные уровни описания движения автотранспорта по улично-дорожной сети в зависимости от размеров моделируемых участков: макроскопический, микроскопический и мезоскопический [78]. Для моделирования транспортных потоков в масштабах городов, регионов и стран применяются модели макроскопического уровня. В этом случае обычно

используются такие единицы измерения, как километры и сутки, а потоки ТС описываются при помощи законов гидродинамики. Модели микроскопического уровня учитывают характер движения отдельных автомобилей на отдельных перекрестках, а единицы измерения представлены метрами и секундами. Модели мезоскопического уровня занимают промежуточное место в данной классификации [79]. Они объединяют математическое описание отдельных перекрёстков в районы и кластеры, оперируя очередями или группами ТС.

Для описания движения автотранспорта на отдельных перекрестках целесообразно использовать модели микроскопического уровня. Они позволяют достичь наиболее точных результатов и часто используются при разработке систем «гибкого» управления автотранспортными потоками на городских перекрёстках.

В свою очередь, микромодели описания трафика делятся на «точные» и «приближенные». «Точные» модели в реальном времени описывают движение ТС на подъездах к перекрестку. Они представлены моделями М. Дж. Бэкманна [80], В. Р. МакНейла [81], Дж. Н. Дарроча [82, 83] и др. «Приближённые» модели учитывают стационарные, сложившиеся условия движения и аппроксимируются к действительной ситуации на дороге. Известными моделями этой группы являются модели Ф. В. Вебстера [84], А. Дж. Миллера [85], Дж. Ф. Ньюелла [86] и др.

Стоит отметить, что упомянутые модели учитывают интенсивности подъезда и разъезда ТС на перекрестках в течение цикла регулирования, принимая их постоянными для данного периода, что в условиях выраженных колебаний интенсивности потока может негативно сказываться на точности моделирования.

1.4 Обзор технических средств систем управления автотранспортными потоками

Одновременно с методами управления транспортными потоками на перекрестках стремительное развитие характерно для технических средств, при помощи которых могут быть реализованы данные методы. Это детекторы транспорта, устройства управления, технологии передачи данных и пр.

1.4.1 Детекторы транспорта

Существующие детекторы транспорта по принципу действия чувствительного элемента разделяют на контактные и бесконтактные. Среди контактных детекторов можно выделить электромеханические, пневмо- и пьезоэлектрические. Детекторы данного типа встраиваются в дорожное полотно и обладают достаточно существенными недостатками: низкой износостойкостью, сложностью установки и обслуживания, необходимостью разрушения дорожного полотна при установке. Среди бесконтактных детекторов транспорта достаточно распространенными являются ферромагнитные детекторы. Они также встраиваются в дорожное полотно. Как правило, имеют те же недостатки, что и детекторы контактного типа. Многие существующие системы адаптивного управления транспортными потоками в своих алгоритмах предусматривают работу с индуктивными детекторами транспорта. Так как данные устройства способны обнаруживать только ТС, находящиеся над местом их установки, применение их на дорогах с большим количеством полос движения, а также увеличение зоны отслеживания трафика на подъездах к перекрестку связано с большими трудовыми и финансовыми затратами на реализацию системы. Другая группа бесконтактных детекторов предполагает их установку над проезжей частью. К ней относятся ультразвуковые, оптические и радиолокационные детекторы. Они просты в установке, а также способны фиксировать транспортный поток одновременно по нескольким полосам движения и в определенной зоне перед местом их установки. Однако, некоторые из перечисленных технологий чувствительны к погодным условиям. На точность ультразвуковых детекторов влияют перепады температур, а дальность обнаружения оптических детекторов, основанных на видеофиксации, зависит от осадков и тумана. Сильный ветер и вибрации от проезда ТС также могут мешать их работе, сбивая угол обзора. Наиболее эффективными на сегодняшний день являются радиолокационные детекторы транспорта. Они нечувствительны к условиям окружающей среды, просты в установке и обслуживании. Дальность обнаружения ТС составляет порядка 40–100 м.

1.4.2 Технологии передачи данных и «облачных» вычислений

Развитие технологий беспроводной передачи данных пятого поколения, «облачных» вычислений и Интернета вещей также открывает новые возможности для технической реализации распределенных систем управления, объединения их в рамках концепции «умный город», накопления и дальнейшего использования больших объемов информации.

Технология 5G объединяет широкополосные, энергозатратные протоколы с узкополосными, энергосберегающими, и открывает новые направления использования, такие как межмашинная связь, Индустрия 4.0, Интернет вещей [87]; позволяет обеспечить беспроводную коммуникацию между устройствами с улучшенными характеристиками:

- скорость передачи данных до 10 Гб/с;
- задержки до 1 мс;
- плотность (количество) подключенных устройств до 10^6 ед./км²;
- увеличение надежности подключения в сотни раз по сравнению с другими существующими стандартами связи.

Технологии «облачных» вычислений предполагают использование множества вычислительных элементов в единой сети [88] и находят применение в современных разработках в области управления транспортными потоками [89, 90] благодаря следующим преимуществам:

1. Доступность и снижение стоимости. Применение данных технологий устраняет необходимость установки дорогостоящих контроллеров на каждом светофорном объекте путем их замены на модули распределенного ввода-вывода, имеющие беспроводную связь с устройством управления в «облаке».

2. Гибкость и масштабируемость. Вычислительные ресурсы таких систем практически не ограничены за счет использования виртуализации. Не ограничена и дальность связи между объектами системы, что особенно актуально для систем дорожного регулирования – каждому из объектов требуется только выход в Интернет.

1.5 Постановка цели и задач исследования

Анализ известных подходов к управлению автотранспортными потоками на перекрестках показал, что существующие системы управления с обратной связью как правило, основываются на регулярно обновляемой обобщенной статистике по параметрам потоков, не учитывая микроколебания интенсивности движения и поведение каждого отдельно взятого ТС.

В то же время, развитие технических средств обнаружения трафика делает возможным увеличение объема информации о транспортном потоке с целью повышения качества управления. Это создает предпосылки к разработке новых систем управления транспортными потоками, которые на основе поступающих данных способны более гибко учитывать параметры движения ТС. Развитие интеллектуальных методов управления позволяет реализовать с их помощью более универсальные решения, применимые в условиях различных перекрестков, недоступные ранее. Развитие технологий передачи данных и «облачных» вычислений открывает новые возможности для масштабирования систем управления и оптимального использования вычислительных ресурсов, упрощая реализацию сложных распределенных систем управления.

Таким образом, ввиду непрерывно растущего объема автомобильных перевозок в мире, недостатков существующих методов управления транспортными потоками, а также современных технических возможностей для повышения качества управления разработка системы управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием является актуальной задачей.

Цель работы: совершенствование системы управления автотранспортными потоками путем научного обоснования структуры и параметров применяемых математических моделей описания трафика и модификации метода интеллектуального управления с использованием принципов нечеткой логики и нейросетевого прогнозирования для повышения эффективности управления потоками автотранспортных средств при проезде регулируемых перекрестков.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Выполнить анализ существующих систем управления дорожным движением и моделей описания трафика, а также перспектив их развития с учетом возможностей современных технических средств.

2. Выполнить теоретические исследования и модификацию математических моделей автотрафика для применения как на отдельных, так и на взаимосвязанных перекрестках.

3. Разработать средства совершенствования системы светофорного регулирования перекрестков на базе интеллектуальных методов управления с привлечением технологий Интернета вещей и «умного» города и рекомендации по практическому использованию предложенных решений.

1.6 Выводы по разделу 1

1. Рассмотрены существующие методы управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием. Известные системы «гибкого» управления оперируют приращением длительности разрешающей фазы регулирования, что делает их нечувствительными к микроколебаниям транспортного потока и приводит к снижению качества управления.

2. Рассмотрены известные модели движения транспортных потоков на перекрестках. Параметры трафика в них, как правило, принимаются постоянными в течение цикла регулирования, что может привести к снижению точности моделирования.

3. Изучены современные технические средства реализации систем управления транспортными потоками. Наиболее эффективными для обнаружения трафика на сегодняшний день являются радиолокационные детекторы транспорта. Современные технологии беспроводной передачи данных и «облачных» вычислений позволяют упростить реализацию распределенных систем управления и оптимизировать использование вычислительных ресурсов.

4. Обоснована актуальность исследования, сформулированы его цель и задачи.

РАЗДЕЛ 2

**МОДИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ АВТОТРАФИКА
С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ
СО СМЕЖНЫХ ПЕРЕКРЕСТКОВ****2.1 Анализ моделей задержки транспортных средств М. Дж. Бэкманна
и Ф. В. Вебстера**

Наиболее применимыми для описания движения автотранспорта на отдельных перекрестках при разработке систем «гибкого» управления являются модели микроскопического уровня. Среди них выделяются «точные» и «приближенные» модели [91].

Одним из известных способов математического описания задержки ТС на перекрестке является модель микроскопического уровня из класса «точных», предложенная М. Дж. Бэкманном. Она позволяет оценить среднюю задержку ТС за цикл светофорного регулирования и использует биномиальный закон прибытия автотранспорта на перекрёсток (2.1).

$$d = \frac{c - g}{c \left(1 - \frac{q}{s}\right)} \left(\frac{q_0}{q} + \frac{c - g + 1}{2} \right), \quad (2.1)$$

где d – средняя задержка одного ТС за цикл регулирования, с;

c – длительность цикла регулирования, с;

g – длительность разрешающей фазы регулирования, с;

q – интенсивность прибытия ТС на перекресток, ед./с;

s – интенсивность разъезда ТС с перекрестка, ед./с;

q_0 – количество ТС в очереди на подъезде к перекрестку, ед.

Использование в модели М. Дж. Бэкманна биномиального закона прибытия ТС на перекрёсток предполагает известную вероятность прибытия ТС на

перекрёсток в некоторый период времени t . Значение t должно быть настолько малым, чтобы в течение данного периода на одной полосе движения могло появиться только одно ТС. Для транспортного потока длительность такого периода можно принять равной 1 с. Модель М. Дж. Бэкманна учитывает среднюю интенсивность движения за цикл регулирования. Таким образом, принимая временной промежуток длительностью 1 с в качестве одного проведенного эксперимента и зная вероятность его успешного исхода (прибытие ТС), по формуле Бернулли можно рассчитать наиболее вероятное количество ТС, которые прибдут на перекрёсток за n подобных экспериментов, то есть за n секунд, где n равно длительности цикла регулирования.

$$P_n(k) = C_n^k p^k (1 - p)^{n-k}, \quad (2.2)$$

где $P_n(k)$ – вероятность прибытия k ТС за n секунд;

C_n^k – сочетание из n по k ;

p – вероятность прибытия ТС за период в 1 с.

Однако, для потока дискретных событий, возникающих за определенный временной промежуток, традиционно более часто применяется распределение Пуассона. При замене $p = \frac{\lambda}{n}$ верно будет следующее (2.3).

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} P(X = k) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k} = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n!}{(n-k)!k!} \right) \left(\frac{\lambda}{n} \right)^k \left(1 - \frac{\lambda}{n} \right)^{n-k} = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \underbrace{\left(\frac{n!}{n^k(n-k)!} \right)}_{\rightarrow 1} \underbrace{\left(\frac{\lambda^k}{k!} \right)}_{\rightarrow e^{-\lambda}} \underbrace{\left(1 - \frac{\lambda}{n} \right)^{n-k}}_{\rightarrow 1} = \\ &= \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Таким образом, в модели задержки ТС М. Дж. Бэкманна автотранспортный поток, прибывающий на перекресток в течение цикла регулирования, является стационарным потоком Пуассона.

Среди приближённых моделей микроскопического уровня достаточно распространена модель задержки ТС Ф. В. Вебстера (2.4) Она сочетает в себе теоретический анализ и численное моделирование [92], однако на практике может давать недостоверные результаты.

$$d = \frac{c \left(1 - \frac{g}{c}\right)^2}{2 \left(1 - \frac{g}{c}x\right)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65 \left(\frac{c}{q^2}\right)^{\frac{1}{3}} x^{2+5\left(\frac{g}{c}\right)} \quad (2.4)$$

где d – средняя задержка одного ТС за цикл регулирования, с;

c – длительность цикла регулирования, с;

g – длительность разрешающей фазы регулирования, с;

q – интенсивность прибытия ТС на перекресток, ед./с;

s – интенсивность разъезда ТС с перекрестка, ед./с;

x – степень загрузки подъезда к перекрестку.

Таким образом, как в модели М. Дж. Бэкманна, так и в модели Ф. В. Вебстера значимыми факторами задержки транспортного потока на перекрёстке являются:

- длительность цикла регулирования;
- длительность разрешающей фазы регулирования;
- интенсивность прибытия ТС на перекресток;
- интенсивность разъезда ТС с перекрестка;
- количество ТС в очереди (степень загрузки подъезда).

Анализ моделей задержки ТС М. Дж. Бэкманна и Ф. В. Вебстера показал, что интенсивности прибытия и разъезда ТС в течение цикла регулирования в обеих моделях принимаются постоянными (учитывается их среднее значение). В условиях города транспортные потоки характеризуются ярко выраженной неравномерностью в течение цикла, которая возникает вследствие светофорного регулирования на соседних перекрестках. В зависимости от степени

согласованности режимов регулирования на соседних перекрестках задержка ТС может быть различна при неизменных прочих параметрах, учитываемых в рассмотренных моделях, что приводит к снижению точности моделирования.

2.2 Сбор эмпирических данных по параметрам автотранспортных потоков на отдельных перекрестках

2.2.1 Планирование эксперимента

Для оценки адекватности существующих математических моделей описания трафика необходимо провести эксперимент и сравнить данные, полученные в результате эксперимента, с результатами моделирования.

Цель эксперимента – оценить адекватность данных, полученных при помощи моделей задержки транспортных потоков М. Дж. Бэкманна и Ф. В. Вебстера данным, полученным экспериментально.

Задача эксперимента – получить экспериментальную зависимость задержки транспортного потока от одного из наиболее значимых факторов, учитываемых в моделях задержки М. Дж. Бэкманна и Ф. В. Вебстера.

Факторы, которые учитываются в рассматриваемых моделях, можно разделить на две группы:

1. Постоянные: длительность разрешающей фазы регулирования, длительность цикла регулирования. В режиме «жесткого» управления эти факторы остаются неизменными для каждого светофорного объекта, и в городских условиях проведения эксперимента могут быть изменены только путем смены наблюдаемого перекрестка. В таких условиях достаточно трудно оценить влияние длительности цикла и соотношения фаз регулирования на время задержки ТС ввиду индивидуальных условий движения на каждом светофорном объекте.

2. Переменные: интенсивность прибытия ТС на перекресток, интенсивность разъезда ТС с перекрестка, величина оставшейся очереди. Интенсивность прибытия ТС на перекресток, как правило, непостоянна в течение дня и недели, что

создаёт благоприятные условия для наблюдения изменений параметров транспортного потока. В условиях отсутствия заторов и препятствий для движения интенсивность разезда ТС с перекрестка зависит от интенсивности прибытия ТС и корректируется условиями движения на каждом конкретном пересечении, такими как угол обзора, востребованность поворотов и др. Величина оставшейся очереди при отсутствии препятствий для движения также зависит от интенсивности прибытия ТС на перекресток.

Таким образом, в условиях города может быть проведен эксперимент по установлению зависимости средней задержки ТС на перекрестке со светофорным регулированием от интенсивности прибытия ТС на перекресток для последующего сравнения данной зависимости с расчетными данными, полученными при помощи математических моделей М. Дж. Бэкманна и Ф. В. Вебстера. Данный эксперимент необходимо повторить на перекрестках с различным режимом работы для оценки точности моделей в различных условиях.

Средняя задержка ТС на перекрёстке для транспортного потока по нескольким полосам движения в одном направлении вычисляется одновременно для всех полос в случае, если движение по ним регулируется одной и той же фазой регулирования. В случаях с отдельной фазой регулирования для осуществления поворота из определенной полосы задержка ТС в данном направлении вычисляется как среднее арифметическое задержек по каждой отдельной полосе.

Диапазон изменения интенсивности движения ТС с учетом условий города Донецка принимается в пределах 0,1–0,3 ед./с. Исходя из этого, исследуемый фактор (интенсивность прибытия ТС на перекресток) можно разделить на 4 уровня:

- 0,10–0,15 ед./с;
- 0,15–0,20 ед./с;
- 0,20–0,25 ед./с;
- 0,25–0,30 ед./с.

Так как исследуемый фактор неуправляем, необходимо провести опыты хотя бы для одного значения интенсивности движения в каждом из установленных диапазонов, чего можно достичь путем выбора различного времени наблюдений в

течение суток и дня в течение недели. Тогда количество проводимых опытов принимается равным количеству уровней фактора и составляет 4.

Количество измерений в одном опыте определяются таким образом, чтобы обеспечить доверительную вероятность проводимых испытаний 95 %, по формуле (2.5) [93].

$$n = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{\Delta^2}, \quad (2.5)$$

где n – количество измерений;

t – доверительный коэффициент (при $p = 95 \% t = 2$);

σ – среднеквадратическое отклонение (определяется в ходе исследования);

Δ – предельная ошибка выборки.

Так как транспортный поток неоднороден и состоит из ТС различного типа (легковые, грузовые автомобили, автобусы, мотоциклы и т. д.), которые имеют различные габариты, измерение интенсивности осуществляется для ТС, приведенных к легковым при помощи коэффициентов приведения [94]. Коэффициент приведения для разных типов ТС приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Коэффициент приведения ТС к легковому автомобилю

№	Транспортные средства	Коэффициент приведения
1	Легковые автомобили	1
2	Мотоциклы с коляской	0,75
3	Мотоциклы и мопеды	0,5
4	Велосипеды	0,3
5	Автобусы:	
6	малой вместимости (10-25 пасс.)	1,5
7	средней вместимости (25-40 пасс.)	2,0
8	большой вместимости (40-55 пасс.)	2,5
9	Троллейбусы	3
10	Грузовые автомобили:	
11	до 2 т	1,5
12	до 6 т	2
13	до 8 т	2,5
14	до 14 т	3

Порядок проведения эксперимента следующий. Для организации эксперимента требуется: 2 человека (Экспериментатор 1 и Экспериментатор 2); 2 видеокамеры; голосовая связь между участниками эксперимента; 2 секундомера с возможностью фиксации промежуточных событий. Экспериментатор 1 располагается на подъезде ТС к перекрёстку так, чтобы в поле его зрения находилась вся предполагаемая очередь ТС, стоп-линия, граница перекрёстка на подъезде к нему и сигналы светофора на перекрёстке. Экспериментатор 2 располагается на выезде за границу перекрёстка. В поле его зрения должны быть сигналы светофора, а также границы перекрёстка на всех возможных направлениях выезда из него кроме направления, с которого осуществляется въезд. Схема расположения экспериментаторов представлена на рисунке 2.1. Для удобства проведения эксперимента участники записывают процесс проезда ТС через перекресток при помощи видеокамер.

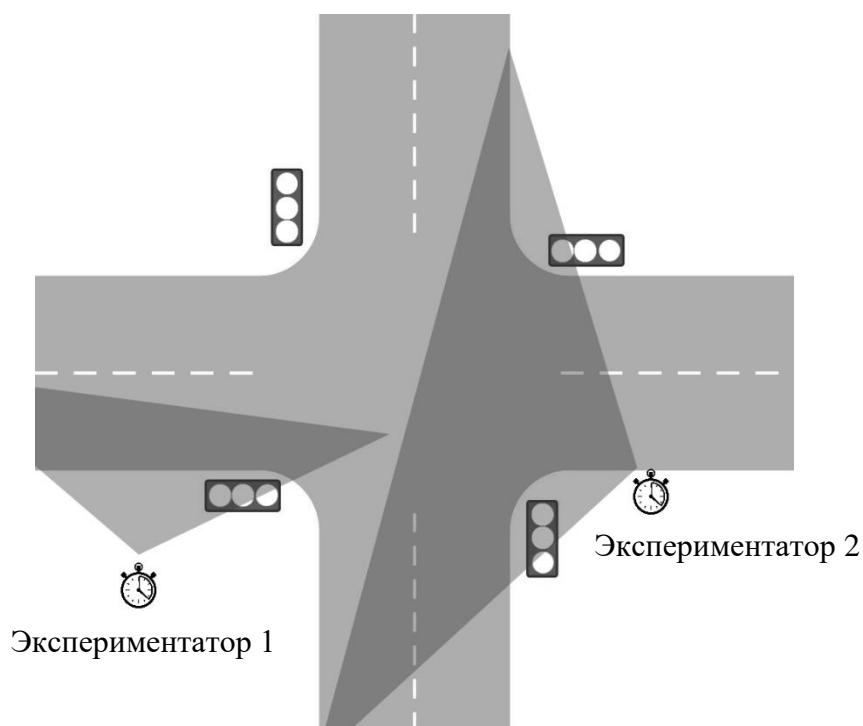


Рисунок 2.1 – Расположение экспериментаторов

В процессе наблюдения или обработки видеоматериала оба экспериментатора запускают секундомеры при включении запрещающей фазы регулирования. Если в этот момент перед въездом на перекрёсток имеется очередь,

Экспериментатор 1 фиксирует количество ТС, находящихся в очереди, а также отмечает ТС, первым прибывшее на перекресток в течение рассматриваемого цикла, и передаёт его приметы Экспериментатору 2. Данное ТС обозначается номером 1.

В течение запрещающей фазы регулирования Экспериментатор 1 фиксирует событие на секундомере в момент остановки ТС перед стоп-линией или в очереди. В течение разрешающей фазы при отсутствии очереди – в момент пересечения ТС стоп-линии. Экспериментатор 2 фиксирует событие на секундомере в момент выезда ТС за границы перекрёстка в любом направлении, а также отмечает время, когда перекресток покидает ТС, прибывшее первым в течение рассматриваемого цикла, согласно его приметам, полученным от Экспериментатора 1.

При окончании цикла регулирования (смены желтого сигнала на красный) оба секундомера останавливаются. Данные о событиях фиксируются.

По итогам эксперимента формируются два массива данных с каждого секундомера. При фиксации ТС, прибывающих на перекресток, под номером 1 фиксируется первое прибытие ТС в течение рассматриваемого цикла регулирования. При фиксации ТС, покидающих перекресток, под номером 1 фиксируется отъезд с перекрестка того ТС, которое первым прибыло на перекресток в течение рассматриваемого цикла регулирования. Моменты отъезда от перекрестка ТС, скопившихся в очереди до начала рассматриваемого цикла регулирования, фиксируются под отрицательными номерами, заканчивая –1.

Далее вычисляются значения величин, используемых в математической модели. Интенсивность прибытия ТС вычисляется по формуле (2.6) [95].

$$q = \frac{n_{\pi}}{t_{\pi}}, \text{ед./с}, \quad (2.6)$$

где n_{π} – число ТС, прибывших на перекресток в течение цикла регулирования, ед.

t_{π} – длительность цикла регулирования, с.

Интенсивность разъезда ТС вычисляется по формуле (2.7).

$$s = \frac{n_p}{t_{\text{ц}}}, \text{ ед./с,} \quad (2.7)$$

где n_p – число ТС, покинувших перекресток в течение цикла регулирования, ед.

$t_{\text{ц}}$ – длительность цикла регулирования, с.

Средняя задержка (по результатам эксперимента) вычисляется по (2.8).

$$d_{\text{эксп.}} = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{\text{п}i} - t_{\text{п}i})}{n}, \quad (2.8)$$

где t_p – время отъезда ТС с перекрёстка с начала цикла регулирования, с;

$t_{\text{п}}$ – время подъезда ТС к перекрёстку с начала цикла регулирования, с;

n – количество ТС, которые пересекли перекресток (начиная с $i=1$), ед.

При расчете среднего времени ожидания по результатам эксперимента учитывается только время прибытия и отъезда для ТС с номером $i \geq 1$. Данные о ТС, прибывших на перекресток до начала рассматриваемого цикла регулирования, но покинувших его в течение данного цикла, исключаются из рассмотрения.

2.2.2 Исследование суточной и недельной неравномерности автотранспортного потока

Для получения статистики по интенсивности движения ТС эксперимент проводится на одном и том же перекрёстке с определенной периодичностью в течение суток и в различные дни недели. Период с 6:00 до 21:00 включает в себя как часы пик, так и периоды спада интенсивности движения. Изменение интенсивности транспортного потока в течение суток для будних и выходных дней в различных направлениях представлено на рисунках 2.2, 2.3.

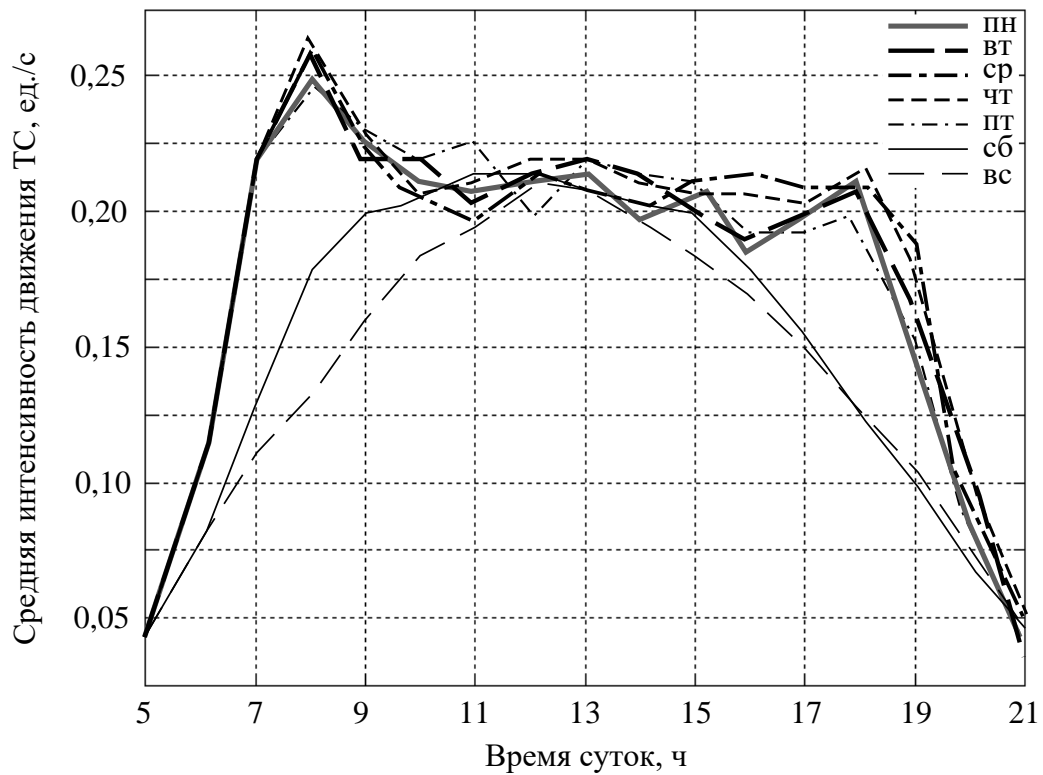


Рисунок 2.2 – Изменение интенсивности движения в течение суток по ул. Артёма на пересечении с пр. Мира

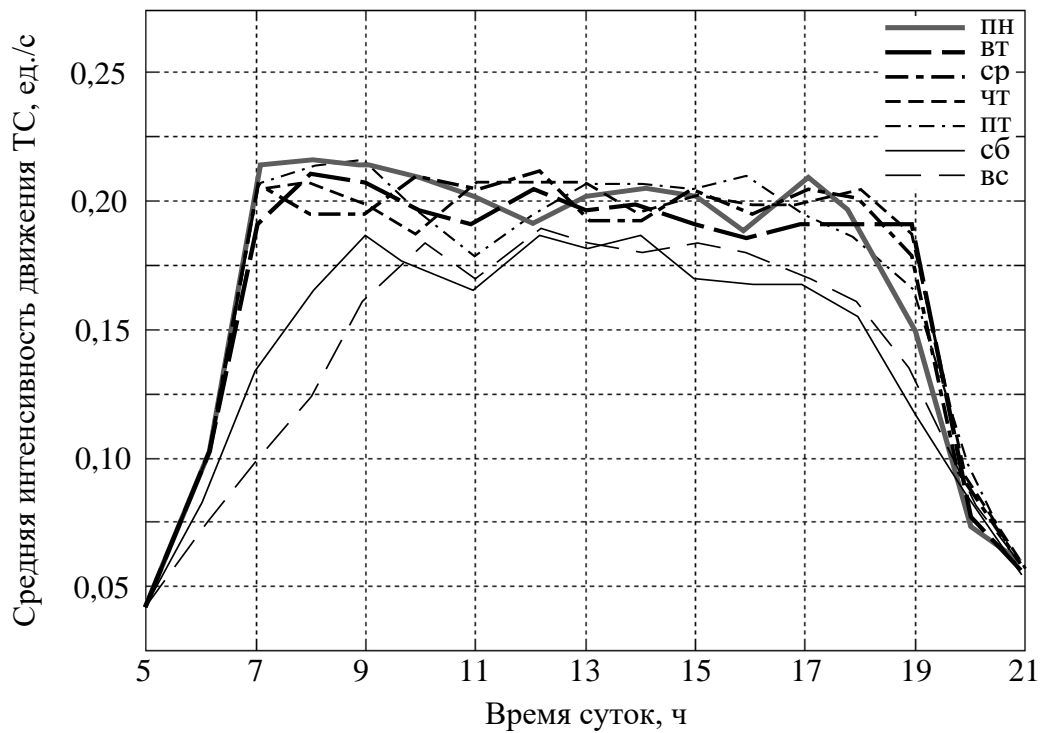


Рисунок 2.3 – Изменение интенсивности движения в течение суток по пр. Мира на пересечении с ул. Артёма

Стоит отметить, что значения интенсивности движения, а также характер её изменения в будние дни различаются незначительно: разброс значений интенсивностей в периоды повышенной загруженности для будних дней не превышает 5 %. Имеют место некоторые различия в изменении интенсивности в выходные дни, что указывает на неравномерность транспортного потока не только в течение суток, но и в течение недели.

Проанализировав зависимость интенсивности дорожного движения в течение суток на примере пересечения ул. Артёма и пр. Мира, можно выявить закономерности:

- 1) интенсивность движения различна по выходным и рабочим дням;
- 2) рост интенсивности движения начинается около 6:00 ежедневно, независимо от дня недели, спад интенсивности движения после пикового периода приходится на 20:00;
- 3) период наибольшей загруженности фиксируется с 7:00 до 19:00 с различным распределением интенсивности внутри него в зависимости от направления движения и дня недели.

2.3 Исследование адекватности моделей задержки ТС М. Дж. Бэкманна и Ф. В. Вебстера

Для исследования адекватности рассматриваемых моделей выбран участок улично-дорожной сети города Донецка, включающий 22 светофорных объекта с различными условиями движения: количеством полос, одно- и двусторонним движением, различной интенсивностью трафика и востребованностью поворотов, наличием регулирования по принципу «зелёной волны». Длительность цикла регулирования на исследуемых перекрестках составляет от 51 до 65 с; длительность разрешающей фазы регулирования – от 15 до 47 с. Схема расположения перекрестков приведена на рисунке 2.4.

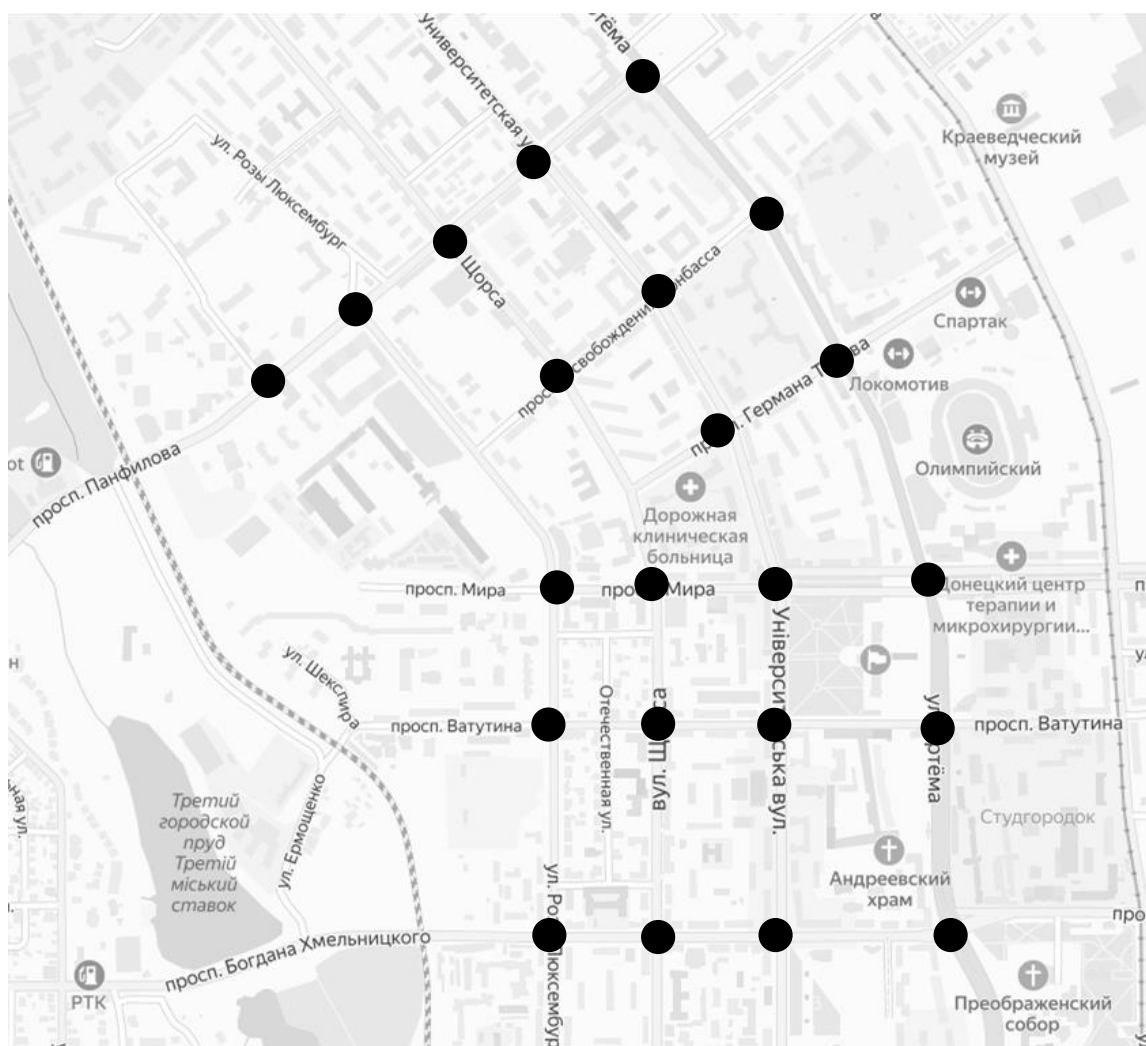


Рисунок 2.4 – Схема расположения исследуемых светофорных объектов

Результаты сравнения экспериментальных и модельных значений задержки ТС на перекрестках различны. На рисунках 2.5–2.8 представлены некоторые типичные разновидности расхождения между исследуемыми характеристиками.

Одно из наименьших значений расхождения данных модели М. Дж. Бэкманна и экспериментальных данных зафиксировано на пересечении пр. Богдана Хмельницкого и ул. Розы Люксембург при движении в сторону ул. Щорса (рисунок 2.5). Оно не превышает 8 %. Модель Ф. В. Вебстера на всех исследуемых пересечениях оказалась нечувствительной к изменениям интенсивности движения в указанном диапазоне, вследствие чего исключена из сравнения. Вероятно, низкая чувствительность модели Ф. В. Вебстера связана с тем, что данная модель предназначена для описания установившихся параметров потоков на больших отрезках времени.

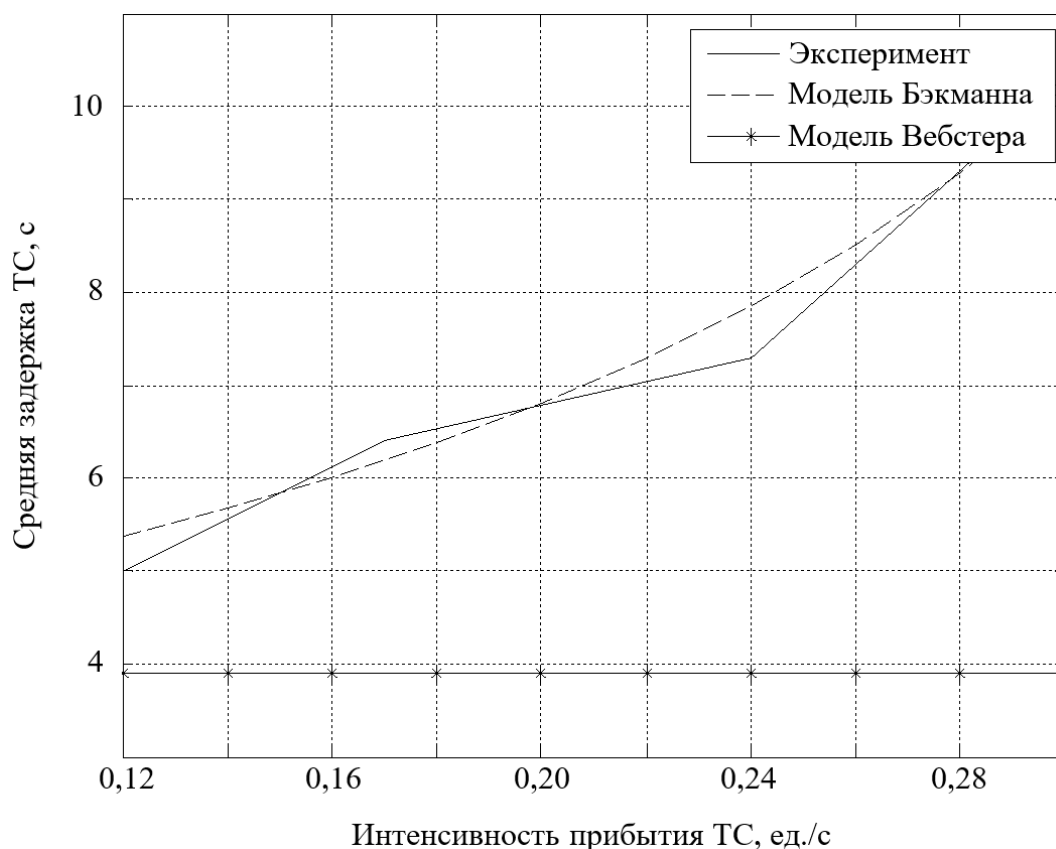


Рисунок 2.5 – Модельная и экспериментальная зависимости средней задержки от интенсивности прибытия ТС на перекрёстке пр. Б. Хмельницкого и ул. Р. Люксембург при движении в сторону ул. Щорса

Однако, степень расхождения данных модели М. Дж. Бэкманна с экспериментальными данными на разных перекрёстках различна. Так, на пересечении ул. Университетская и пр. Освобождения Донбасса (рисунок 2.6) задержка ТС, полученная экспериментально, ниже расчетных данных в среднем на 85 % на всём диапазоне изменения интенсивности движения. Задержка ТС на пересечении пр. Мира и ул. Университетская при движении в сторону ул. Щорса (рисунок 2.7) имеет третью характеристику, отличную от предыдущих. Экспериментальные значения ниже расчетных в среднем на 46 %.

Зафиксированы также случаи, когда экспериментальные значения задержки превышают значения, рассчитанные при помощи модели М. Дж. Бэкманна. На пересечении пр. Панфилова и ул. Университетская экспериментальные значения задержки превышают модельные в среднем на 86 % (рисунок 2.8).

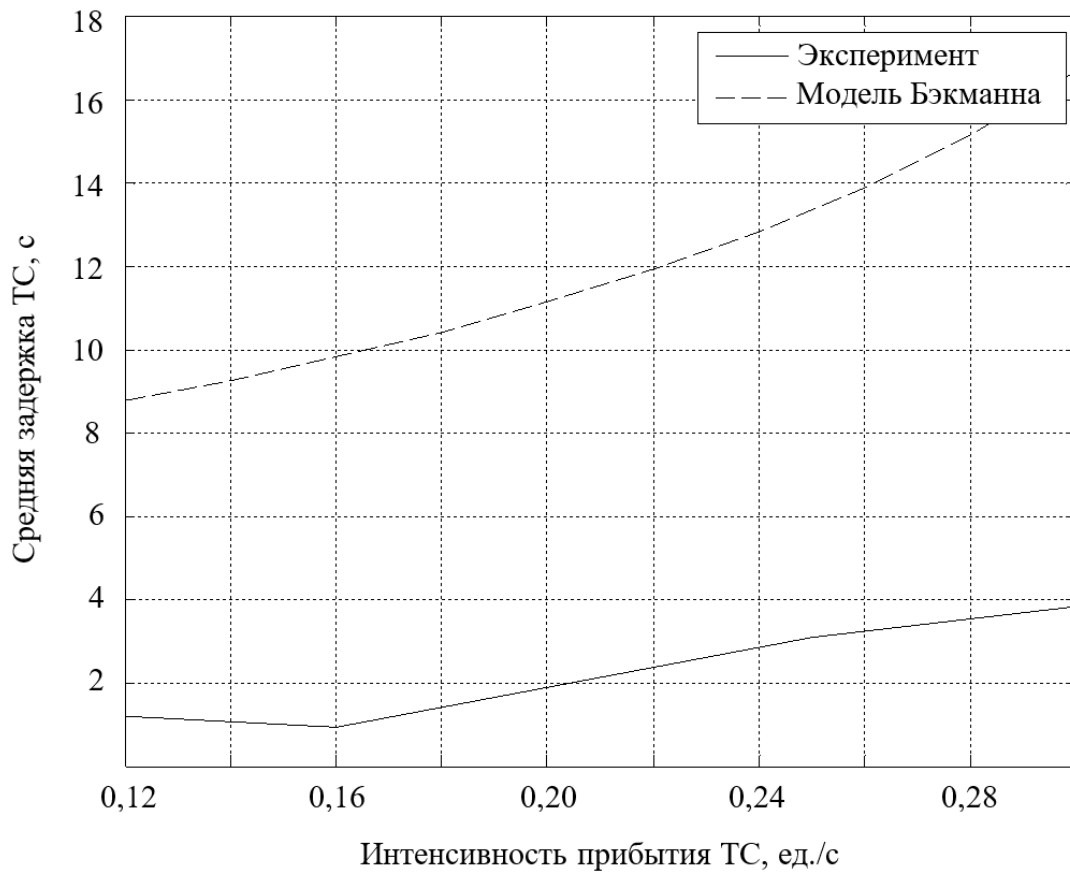


Рисунок 2.6 – Модельная и экспериментальная зависимости средней задержки от интенсивности прибытия ТС на перекрёстке ул. Университетская и пр. Освобождения Донбасса

На основании измерений, выполненных на перекрестках, представляется возможным рассчитать коэффициент неравномерности транспортного потока в течение цикла регулирования по формуле (2.9).

$$K_H = \frac{c/g \cdot q}{Q}, \quad (2.9)$$

где c – длительность цикла регулирования;

g – длительность разрешающей фазы регулирования;

q – интенсивность прибытия ТС во время разрешающей фазы;

Q – интенсивность прибытия ТС за цикл.

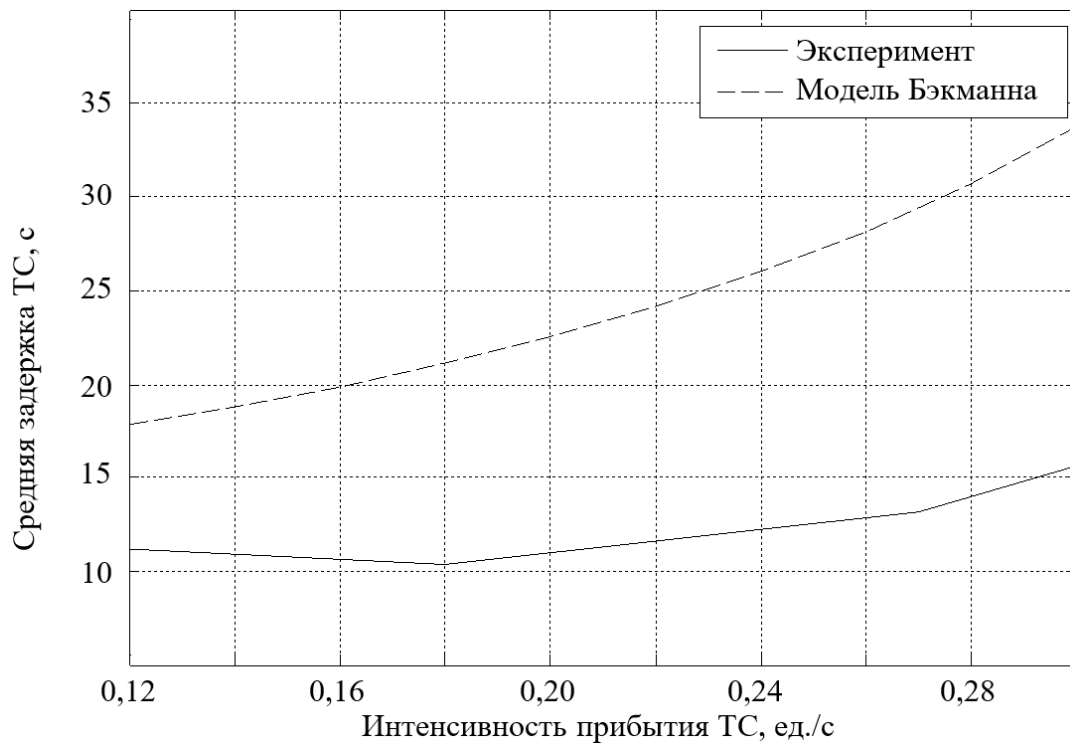


Рисунок 2.7 – Модельная и экспериментальная зависимости средней задержки от интенсивности прибытия ТС на перекрёстке пр. Мира и ул. Университетская при движении в сторону ул. Щорса

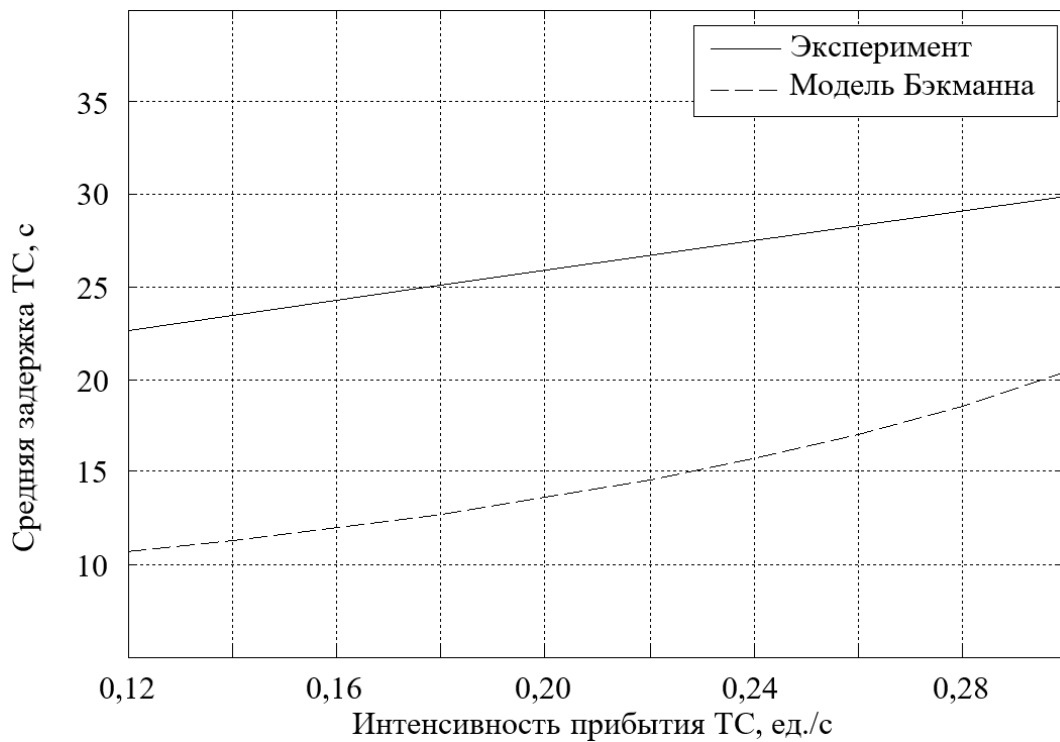


Рисунок 2.8 – Модельная и экспериментальная зависимости средней задержки от интенсивности прибытия ТС на перекрёстке пр. Панфилова и ул. Университетская при движении в сторону ул. Артёма

Параметры регулирования перекрестков, для которых приведены характеристики задержки ТС, а также некоторые особенности движения на них сведены в таблицу 2.2. В таблице приняты следующие обозначения:

g – длительность разрешающей фазы;

c – длительность цикла;

K_n – коэффициент неравномерности потока ТС;

S – расстояние до вышестоящего перекрестка;

δ – расхождение между экспериментальными и модельными данными.

Таблица 2.2 – Параметры исследуемых светофорных объектов

Перекресток	Направление	g , с	c , с	K_n	S , м	δ , %
Б. Хмельницкого × Р. Люксембург	ул. Щорса	24	70	1,05	940	8
Университетская × Осв. Донбасса	пр. Панфилова	45	70	1,33	280	85
Мира × Университетская	ул. Щорса	27	70	1,14	260	46
Панфилова × Университетская	ул. Артёма	32	70	1,11	230	86

Стоит отметить, что на пересечении пр. Богдана Хмельницкого и ул. Розы Люксембург, где расхождение модельных и экспериментальных данных одно из наименьших, интенсивность движения ТС имеет более равномерный характер, что отражает коэффициент неравномерности транспортного потока K_n . На других перекрестках, напротив, транспортный поток имеет ярко выраженную неравномерность (значение K_n с большим отклонением от единицы). Иными словами, транспортный поток в течение цикла регулирования является нестационарным, что не учитывается в модели М. Дж. Бэкманна. Данное явление связано с работой вышестоящего светофорного объекта, который формирует

транспортный поток в группы посредством попеременного пропуска ТС. Так, изначально равномерный поток накапливается на вышестоящем перекрёстке во время горения запрещающего сигнала светофора и покидает его только при включении разрешающего сигнала. В случае прибытия группы ТС на следующий по ходу движения перекрёсток во время разрешающей фазы регулирования может быть достигнуто минимальное значение задержки, т. к. большинство ТС пройдут перекрёсток без остановки. В случае прибытия группы ТС во время запрещающей фазы значение задержки ТС может оказаться выше, чем при равномерной интенсивности движения потока, т. к. большинство ТС группы вынуждено остановиться. Данная особенность движения транспортных потоков в условиях города используется в управлении по принципу «зеленой волны». Под влиянием таких факторов, как большое расстояние между перекрёстками, наличие нерегулируемых перекрёстков и развязок, дорожных сооружений и пр. группы ТС, сформированные на вышестоящем перекрёстке, распадаются, стремясь к равномерности. Данное явление имеет место на перекрёстке пр. Богдана Хмельницкого и ул. Розы Люксембург и связано с бóльшим расстоянием до вышестоящего перекрестка, чем в случаях с другими исследуемыми светофорными объектами.

Таким образом, приведенный в таблице 2.2 коэффициент неравномерности транспортного потока может быть использован в качестве критерия применимости модели М. Дж. Бэкманна. При значениях $0,95 \leq K_H \leq 1,05$ расхождение модельных и экспериментальных данных не превышает 8 %. При значениях $K_H > 1,05$ и $K_H < 0,95$ модельные данные не адекватны экспериментальным. Для этого случая необходима корректировка модели М. Дж. Бэкманна, учитывающая неравномерность транспортного потока, а также основные влияющие на неё факторы: расстояние до вышестоящего перекрёстка; долю ТС, осуществляющих поворот из конфликтующих направлений на вышестоящем перекрёстке; режим светофорного регулирования на вышестоящем перекрёстке.

2.4 Исследование применимости модели задержки ТС М. Дж. Бэкманна при моделировании сети перекрёстков

При построении математической модели сети перекрёстков следует учитывать их взаимосвязь по транспортному потоку. Интенсивность прибытия ТС на перекрёсток, расположенный внутри рассматриваемого участка сети имеет характер уже не случайный, а определяемый ситуацией на вышестоящих светофорных объектах. Таким образом, при движении через взаимосвязанные перекрёстки только в прямом направлении интенсивность прибытия ТС к рассматриваемому перекрёстку равняется интенсивности разъезда с вышестоящего перекрёстка (рисунок 2.9): $q_2 = s_1$ (цифрами 1 и 2 на рисунке 2.9 обозначены перекрестки, имеющие последовательную связь по транспортному потоку).

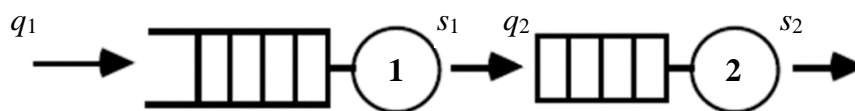


Рисунок 2.9 – Связь перекрёстков по транспортному потоку

В большинстве случаев на выезде с перекрёстка имеют место повороты части ТС, поэтому значение s_1 уменьшается за счет ТС, повернувших из главного потока в конфликтующем направлении, и увеличивается за счет движения ТС, повернувших в направлении нижестоящего перекрёстка из конфликтующего потока. Данный процесс показан на рисунке 2.10 и описан формулой (2.10).

$$q_{i+1} = s_i - (k_{\text{л}}s_i + k_{\text{п}}s_i) + (k_{\text{кл}}s_{ik} + k_{\text{кп}}s_{ik}), \quad (2.10)$$

где q_{i+1} – интенсивность прибытия ТС на нижестоящий перекрёсток, ед./с;

s_i – интенсивность разъезда ТС с вышестоящего перекрёстка, ед./с;

$k_{\text{л}}$ и $k_{\text{п}}$ – коэффициенты, определяющие долю ТС, совершающих левый и правый повороты из рассматриваемого потока на вышестоящем перекрестке;

s_{ik} – интенсивность разъезда ТС конфликтующего потока с вышестоящего перекрёстка, ед./с;

$k_{кл}$ и $k_{кп}$ – коэффициенты, определяющие долю ТС конфликтующего потока, совершающих левый и правый поворот в направлении нижестоящего перекрёстка.

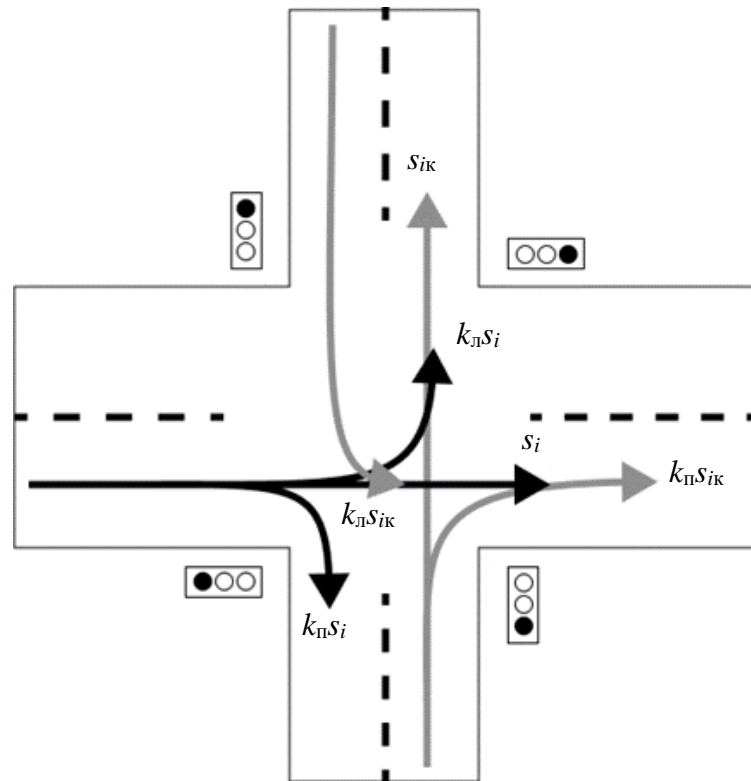


Рисунок 2.10 – Перераспределение интенсивности транспортного потока на перекрёстке

При разъезде с вышестоящего перекрестка автомобили формируются в группы, которые ограничиваются действием разрешающей фазы регулирования. Это явление в совокупности с величиной сдвига разрешающей фазы регулирования на следующем перекрёстке по отношению к вышестоящему перекрёстку оказывает существенное влияние на качество управления трафиком. Данная величина определяет, пройдёт ли сформированная группа текущий перекрёсток на зелёный свет без остановки или попадёт на запрещающую фазу регулирования.

2.4.1 Сбор эмпирических данных по параметрам автотранспортных потоков на взаимосвязанных перекрестках

Для построения модели сети перекрёстков необходимо получить эмпирические данные об исследуемых светофорных объектах по следующим параметрам:

1. Режим регулирования каждого перекрёстка: длительность цикла, порядок и длительность фаз.
2. Величина сдвига разрешающей фазы регулирования на соседних перекрёстках дорожной сети.
3. Интенсивность прибытия и разъезда ТС по каждой полосе и каждому направлению исследуемых перекрёстков (по плану, рассмотренному в п. 2.2).
4. Время, затрачиваемое ТС на движение между перекрёстками.
5. Доля ТС, выполняющих левый и правый поворот там, где это возможно.
6. Время, затрачиваемое ТС на выполнение поворота.

Для проведения перечисленных измерений требуется: 2 человека (Экспериментатор 1 и Экспериментатор 2); 2 видеокамеры; голосовая связь между участниками; 2 секундомера с возможностью фиксации промежуточных событий.

Величина сдвига разрешающей фазы регулирования на соседних перекрёстках измеряется следующим образом. Экспериментатор 1 располагается так, чтобы в поле его зрения находились сигналы светофора на вышестоящем перекрёстке, и в момент начала разрешающей фазы на нём посредством голосовой связи даёт сигнал Экспериментатору 2. Экспериментатор 2 располагается так, чтобы в поле его зрения находились сигналы светофора на нижестоящем перекрёстке, и при получении сигнала от Экспериментатора 1 запускает секундомер. В момент, когда на светофоре нижестоящего перекрёстка в рассматриваемом направлении загорится зеленый свет, секундомер останавливается. Измеренное время является величиной сдвига.

Порядок измерения времени движения ТС между перекрёстками следующий. Экспериментатор 1 располагается на выезде за границу вышестоящего перекрёстка

так, чтобы в его поле зрения находились все ТС, покидающие перекрёсток в направлении нижестоящего перекрёстка, а также сигналы светофора. Экспериментатор 2 располагается на подъезде к нижестоящему перекрёстку и контролирует прибытие автомобилей со стороны вышестоящего перекрёстка.

При включении разрешающей фазы регулирования на вышестоящем перекрёстке оба экспериментатора запускают секундомер, синхронизируя свои действия при помощи голосовой связи. При пересечении ТС границы вышестоящего перекрёстка Экспериментатор 1 фиксирует промежуточное событие на секундомере. Экспериментатор 2 фиксирует промежуточное событие на секундомере при пересечении ТС границы нижестоящего перекрёстка, либо при его остановке в очереди в случае, если она есть в момент прибытия ТС. Затем вычисляется среднее время движения ТС между перекрестками.

Порядок измерения доли ТС, выполняющих поворот, и времени поворота требует наличия еще одного участника (Экспериментатор 3). Для повышения удобства и качества проведения эксперимента его лучше выполнять при помощи видеозаписи. Экспериментатор 1 располагается на выезде за границу исследуемого перекрёстка так, чтобы в его поле зрения находились все ТС, покидающие перекрёсток в прямом направлении по рассматриваемой полосе. Экспериментатор 2 располагается на выезде за границу исследуемого перекрёстка так, чтобы в его поле зрения находились все ТС, въезжающие на перекрёсток и покидающие его в направлении правого поворота. Экспериментатор 3 располагается на выезде за границу исследуемого перекрёстка так, чтобы в его поле зрения находились все ТС, въезжающие на перекрёсток и покидающие его в направлении левого поворота.

При обработке полученного видеоматериала Экспериментатор 1 фиксирует промежуточное событие на секундомере в момент, когда на перекрёсток въезжает ТС, движущееся прямо, а также в момент, когда указанное ТС покидает перекрёсток. Экспериментатор 2 фиксирует промежуточное событие на секундомере в момент, когда на перекрёсток въезжает ТС, намеревающееся совершить правый поворот, а также в момент, когда указанное ТС покидает перекрёсток. Экспериментатор 3 фиксирует промежуточное событие на

секундомере в момент, когда на перекрёсток въезжает ТС, намеревающееся совершить левый поворот, а также в момент, когда указанное ТС покидает перекрёсток. Все экспериментаторы ведут подсчет ТС, покинувших перекрёсток, при прохождении ТС перекрёстка в каждом направлении.

По результатам эксперимента вычисляется среднее время, затрачиваемое на выполнение правого, левого поворота и проезд перекрестка в прямом направлении, а также процентное отношение количества ТС, проехавших в каждом направлении, к общему количеству подсчитанных ТС.

Количество измерений во всех перечисленных опытах, кроме определения режима регулирования на перекрёстке и величины сдвига разрешающей фазы регулирования на соседних перекрёстках, определяется согласно (2.5).

2.4.2 Разработка модификации модели задержки ТС М. Дж. Бэкманна для взаимосвязанных перекрестков

Эмпирические данные о величине сдвига разрешающей фазы регулирования между перекрестками и о времени движения ТС от вышестоящего до рассматриваемого перекрестка, отражающие наиболее характерные случаи, а также расхождение экспериментальных данных с показаниями модели М. Дж. Бэкманна о задержке ТС сведены в таблицу 2.3, в которой приняты следующие обозначения:

t_c – величина сдвига разрешающей фазы;

$t_{дв}$ – время движения ТС между перекрестками;

c – длительность цикла регулирования;

d_c – отношение величины сдвига разрешающей фазы к длительности цикла регулирования;

$d_{дв}$ – отношение времени движения ТС между перекрестками к длительности цикла регулирования;

δ – расхождение между экспериментальными и модельными данными о задержке ТС.

Таблица 2.3 – Данные о величине сдвига разрешающей фазы регулирования и времени движения ТС между перекрестками

Перекресток	Направление	t_c , с	$t_{дв}$, с	c , с	d_c , %	$d_{дв}$, %	δ , %
Мира × Университетская	ул. Щорса	4 (74)	18,3	70	6 (106)	26	–46
Р. Люксембург × Ватутина	ул. Шекспира	9	13,1	56	16	23	–68
Университетская × Осв. Донбасса	пр. Панфилова	21	18,3	70	30	26	–85
Артёма × Титова	пр. Мира	28	20,7	57	49	36	±5
Артёма × Мира	пр. Титова	43	17,6	62	69	28	+79
Панфилова × Университетская	ул. Артёма	55	15,5	70	78	22	+86

На основе данных, приведенных в таблице 2.3, построен график зависимости расхождения модельных и экспериментальных данных от величины сдвига разрешающей фазы регулирования между рассматриваемым и вышестоящим перекрестками (рисунок 2.11).

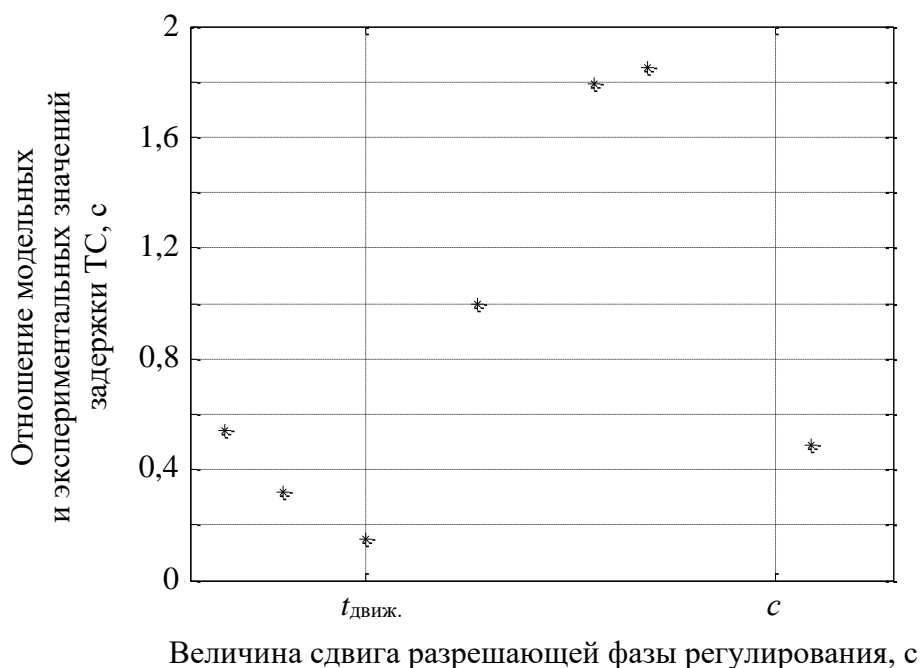


Рисунок 2.11 – Зависимость расхождения модельных и экспериментальных данных от величины сдвига разрешающей фазы регулирования между рассматриваемым и вышестоящим перекрестками

Так как режим работы каждого светофорного объекта индивидуален, величина сдвига разрешающей фазы на рисунке 2.11 обозначается относительно длительности цикла регулирования на каждом из рассматриваемых перекрестков. Показания модели М. Дж. Бэкманна приняты за единицу (100 %). Показания, полученные экспериментально, представлены в виде соответствующей доли модельных значений.

Сдвиг разрешающей фазы регулирования на перекрёстке по отношению к вышестоящему перекрестку, равный среднему времени движения автомобилей между ними, позволяет достичь минимальной задержки ТС в условиях неравномерного потока и может быть рассчитан как отношение расстояния до вышестоящего перекрестка к скорости транспортного потока (S/V). Полученное значение времени сдвига позволяет пропустить большую часть ТС, движущихся в прямом направлении, на зеленый свет и минимизировать задержку, что подтверждается данными, полученными в результате эксперимента. Модель М. Дж. Бэкманна же показывает усредненное значение задержки ТС для равномерного потока. В случае, если основная часть ТС прибывает на перекресток во время запрещающей фазы регулирования, образуется очередь, что приводит к увеличению времени задержки и превышению расчетных значений. В случае, если ТС прибывают на перекресток в течение разрешающей и запрещающей фаз в соизмеримых пропорциях, экспериментальные значения близки к расчетным.

Как видно на рисунке 2.11, функция зависимости расхождения модельных и экспериментальных данных от величины сдвига разрешающей фазы имеет форму, близкую к косинусоидальной. Период косинусоиды равен длительности цикла регулирования c на рассматриваемом перекрёстке, так как значения задержки $\Delta t > c$ фактически равны значениям $\Delta t - c$ за счет цикличности переключения сигналов светофора.

Аналитически зависимость можно описать следующим образом (2.11).

$$\delta = -\cos\left(\frac{2\pi\Delta t}{c} + \frac{S}{V}\right) + 1, \quad (2.11)$$

где Δt – величина сдвига разрешающей фазы регулирования на рассматриваемом перекрёстке, с;

c – длительность цикла регулирования, с;

S – расстояние до вышестоящего перекрёстка, м;

V – скорость транспортного потока, м/с.

График экспериментальной и аналитической зависимостей задержки ТС от величины сдвига разрешающей фазы регулирования приведен на рисунке 2.12.

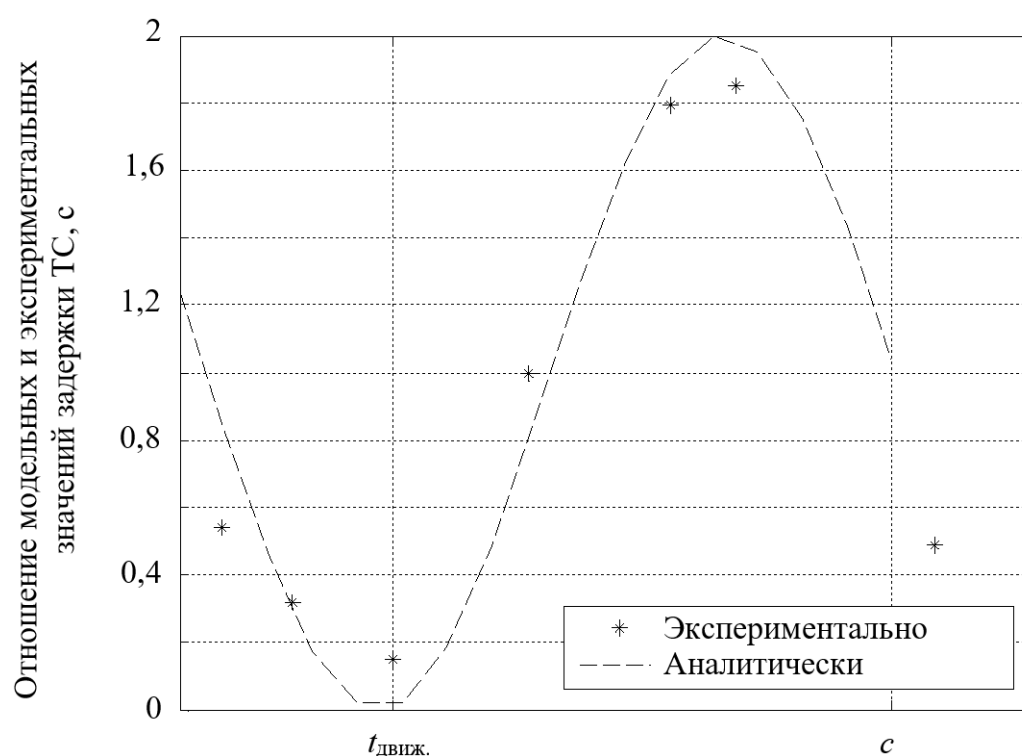


Рисунок 2.12 – Экспериментальная и аналитическая зависимости задержки ТС от величины сдвига разрешающей фазы регулирования на перекрёстке

Применительно к абсолютным значениям задержки ТС при неравномерном транспортном потоке в прямом направлении усовершенствованная формула Бэкманна, исходя из (2.1) и (2.11), имеет вид (2.12).

$$d = \left(-\cos\left(\frac{2\pi\Delta t}{c} + \frac{S}{V}\right) + 1 \right) \cdot \frac{c - g}{c\left(1 - \frac{q}{S}\right)} \left(\frac{q_0}{q} + \frac{c - g + 1}{2} \right) \quad (2.12)$$

Следует также учитывать, что ТС, выполняющие поворот с конфликтующих направлений, вливаются в основной поток во время запрещающей фазы регулирования в прямом направлении его движения. Таким образом, они движутся отдельно от групп ТС, сформированных на вышестоящем перекрёстке, заполняя промежутки между ними. Исходя из этого, если интенсивность разъезда с перекрёстка ТС, движущихся в прямом направлении, равна интенсивности разъезда с перекрёстка ТС, вливающих слева или справа в рассматриваемый поток, такой поток можно считать равномерным. Отношение интенсивности разъезда ТС, движущихся в прямом направлении, и интенсивности разъезда ТС, выполнивших поворот, предлагается учитывать в качестве показателя неравномерности транспортного потока. Формулу (2.12) можно дополнить следующим образом (2.13).

$$d = \left(- \left(1 - \frac{q_{\text{кл}} + q_{\text{кп}}}{q} \right) \cdot \cos \left(\frac{2\pi\Delta t}{c} + \frac{S}{V} \right) + 1 \right) \cdot \frac{c - g}{c \left(1 - \frac{q}{S} \right)} \left(\frac{q_0}{q} + \frac{c - g + 1}{2} \right) \quad (2.13)$$

По формуле (2.13) при отношении интенсивностей разъезда ТС, движущихся в прямом направлении, и ТС, выполнивших поворот, равно единице, неравномерная составляющая модели умножается на ноль, и задержка ТС рассчитывается для условий равномерного потока согласно исходной модели М. Дж. Бэкманна. При значении показателя неравномерности от 0 до 1 в расчете задержки ТС присутствует как равномерная составляющая, так и неравномерная в соответствующих пропорциях.

Однако в случае, если интенсивность разъезда ТС, выполнивших поворот, превышает интенсивность разъезда ТС, движущихся в прямом направлении, формулу (2.13) следует изменить (2.14).

$$d = \left(\left(1 - \frac{q}{q_{\text{кл}} + q_{\text{кп}}} \right) \cdot \cos \left(\frac{2\pi\Delta t}{c} + \frac{S}{V} \right) + 1 \right) \cdot \frac{c - g}{c \left(1 - \frac{q}{S} \right)} \left(\frac{q_0}{q} + \frac{c - g + 1}{2} \right) \quad (2.14)$$

Тогда в числителе показателя неравномерности должна находиться меньшая интенсивность разезда ТС (2.14). А так как ТС, выполнившие поворот, покидают вышестоящий перекрёсток в период действия запрещающей фазы регулирования, в случае их преобладания в потоке значение задержки на перекрёстке находится в противофазе по отношению к зависимости, представленной на рисунке 2.12. Следовательно, знак при косинусе меняется на положительный.

Для проверки адекватности модифицированной модели задержки ТС М. Дж. Бэкманна экспериментальное исследование проведено на участке дорожной сети г. Ростов-на-Дону, состоящем из 6 светофорных объектов (рисунок 2.13).

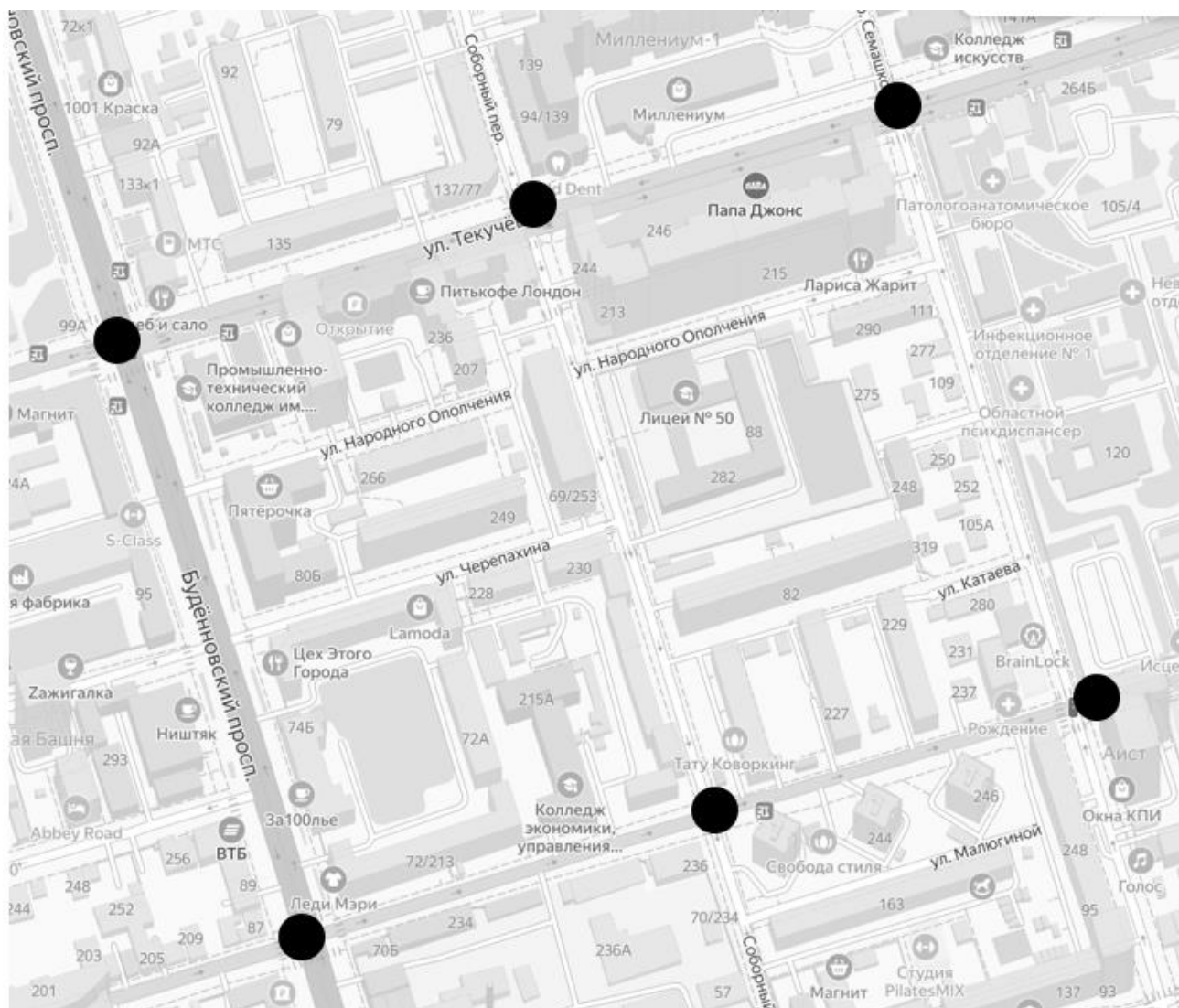


Рисунок 2.13 – Схема расположения исследуемых светофорных объектов

Зависимости задержки ТС от интенсивности движения на перекрёстках исследуемого участка представлены на рисунках 2.14–2.16. Введение дополнительной составляющей модели позволило достичь расхождения модельных данных с экспериментальными в пределах 5 % для всех рассмотренных случаев.

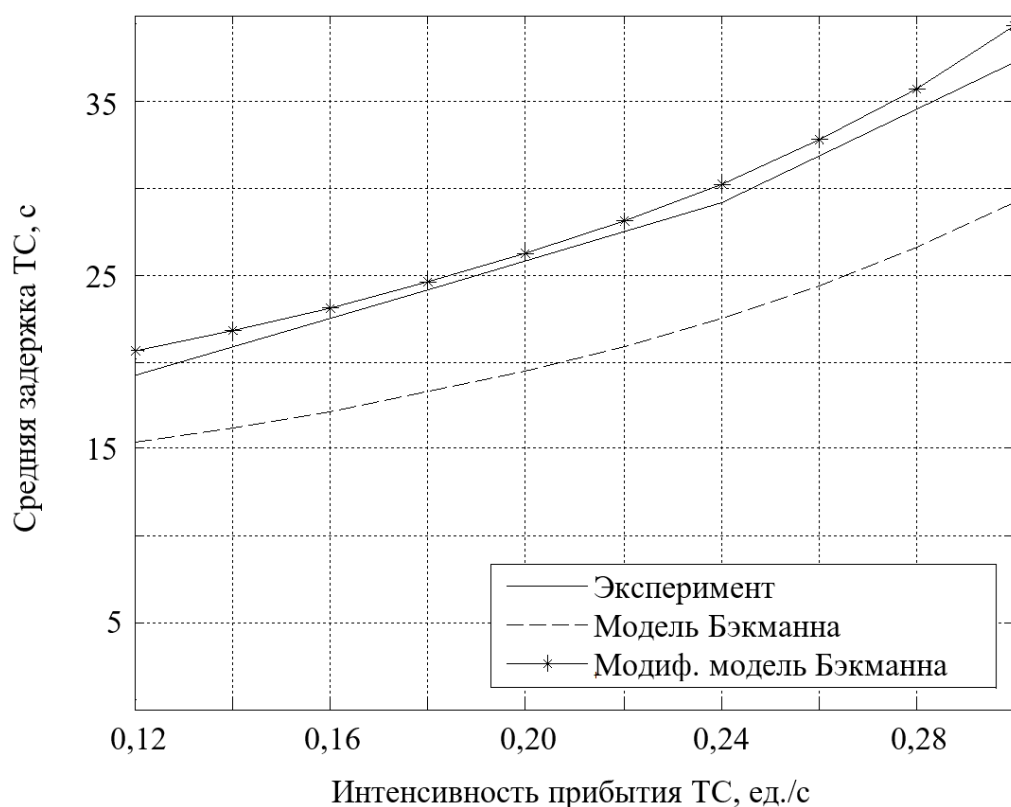


Рисунок 2.14 – Зависимости средней задержки от интенсивности прибытия ТС на перекрёстке пр. Буденновский и ул. Текучёва

Таким образом, дополнение математической модели задержки ТС М. Дж. Бэкманна зависимостью задержки от сдвига разрешающей фазы регулирования для связанных перекрёстков делает модель М. Дж. Бэкманна адекватной при неравномерном транспортном потоке и пригодной для моделирования задержки ТС на светофорных объектах, связанных по транспортному потоку в условиях города.

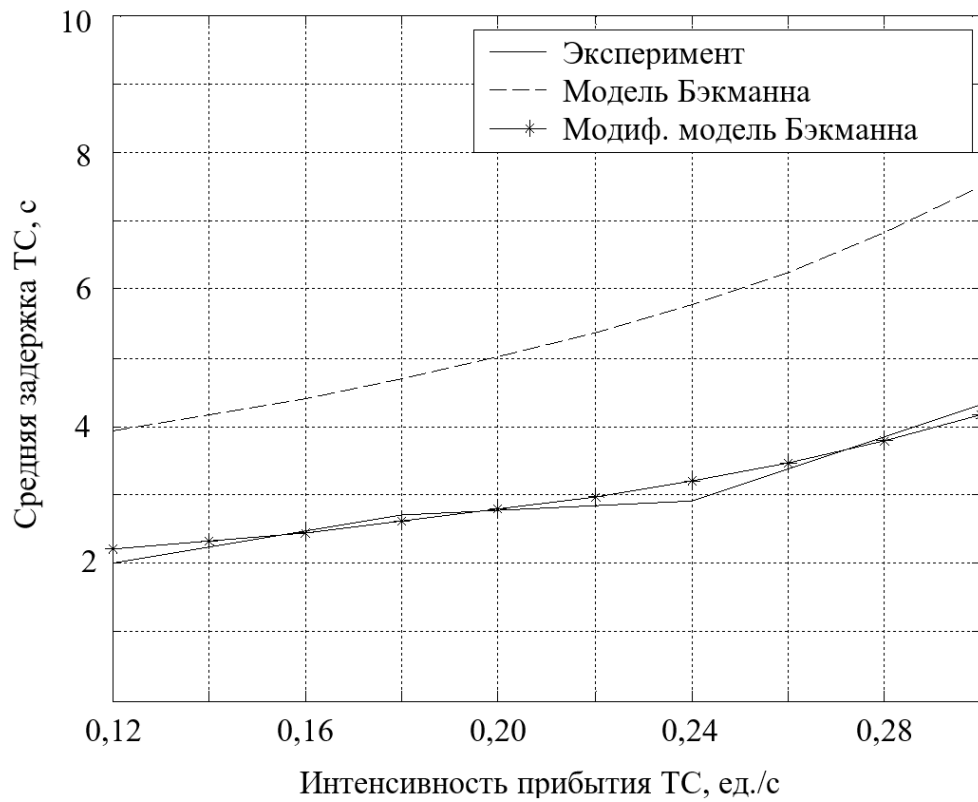


Рисунок 2.15 – Зависимости средней задержки от интенсивности прибытия ТС на перекрестке ул. Текучёва и пер. Соборный

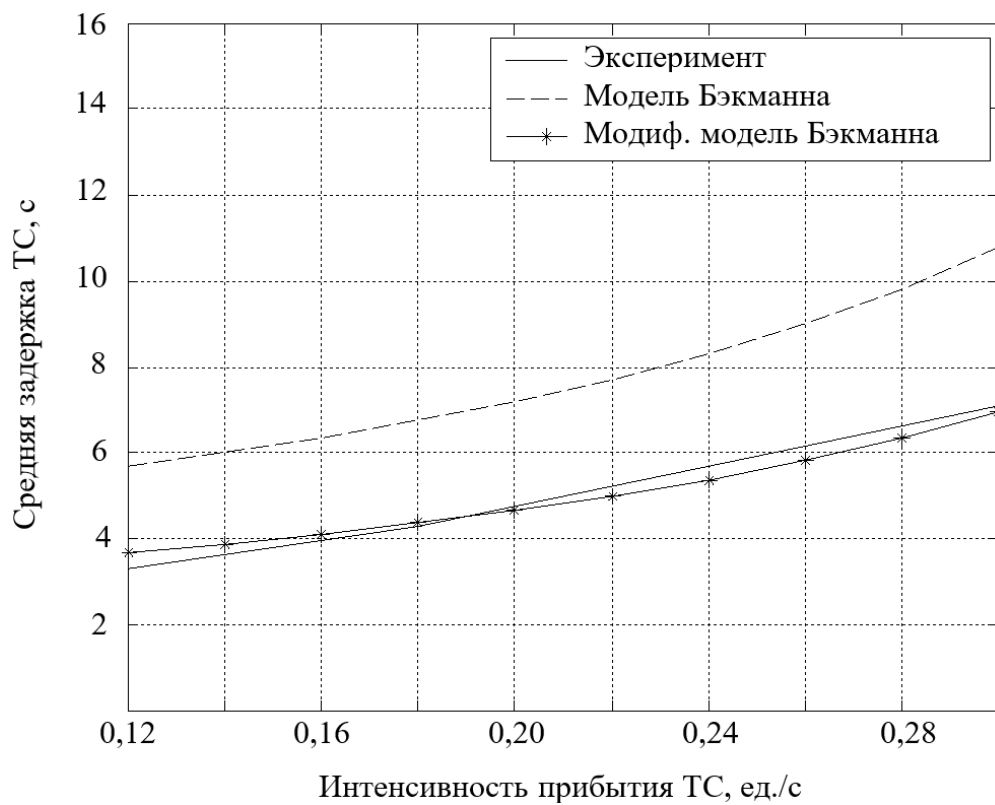


Рисунок 2.16 – Зависимости средней задержки от интенсивности прибытия ТС на перекрестке пр. Буденновский и ул. Варфоломеева

2.5 Выводы по разделу 2

1. Рассмотрены получившие широкое применение модели задержки ТС на перекрестках микроскопического уровня: модель М. Дж. Бэкманна, относящаяся к классу «точных» и модель Ф. В. Вебстера из класса «приближенных». Обе модели принимают интенсивности подъезда и разъезда ТС на перекрёстке постоянными в течение цикла регулирования, что может негативно сказываться на точности моделирования в условиях выраженных колебаний интенсивности транспортного потока в городе.

2. Проведен эксперимент для проверки адекватности экспериментальным данным задержки ТС, вычисленной при помощи моделей М. Дж. Бэкманна и Ф. В. Вебстера. Модель Ф. В. Вебстера оказалась нечувствительной к зафиксированным в ходе эксперимента изменениям интенсивности движения. Модель М. Дж. Бэкманна показала различные результаты. При моделировании равномерного потока расхождение между модельными и экспериментальными данными не превышает 8 %, однако в условиях неравномерного потока ТС модельные данные не адекватны экспериментальным, и в некоторых случаях расхождение достигает 86 %. В качестве критерия применимости модели М. Дж. Бэкманна предлагается использовать коэффициент неравномерности транспортного потока. При значениях данного коэффициента в диапазоне от 0,95 до 1,05 модель М. Дж. Бэкманна предлагается считать применимой.

3. Исследовано влияние сдвига разрешающей фазы регулирования между рассматриваемым и вышестоящим перекрестками на значение задержки ТС на перекрестке. Установлено, что, в зависимости от значения сдвига, фактическая задержка ТС может быть как больше, так и меньше значений, полученных при помощи модели М. Дж. Бэкманна. Зависимость расхождения модельных и экспериментальных данных от величины сдвига разрешающей фазы регулирования может быть описана косинусоидальной функцией. Интенсивность движения ТС, вливающих в рассматриваемый поток из конфликтующих направлений на вышестоящем перекрестке, оказывает влияние на характер

транспортного потока, делая его более равномерным, что также следует учитывать при вычислении задержки ТС.

4. Разработана модификация модели М. Дж. Бэкманна в виде выражения, учитывающего сдвиг режима регулирования на соседних светофорных объектах, а также неравномерность транспортного потока. Полученное усовершенствование делает модель М. Дж. Бэкманна применимой в условиях перекрестков с высокой степенью взаимосвязи по транспортному потоку. Введение дополнительной составляющей модели позволило достичь расхождения модельных данных с экспериментальными в пределах 5 % для всех рассмотренных случаев.

Рассматриваемые в разделе вопросы опубликованы в научных работах соискателя [96, 97].

РАЗДЕЛ 3

**МОДИФИКАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ
НА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКАХ**

3.1 Структурная схема системы управления

Процесс «гибкого» светофорного регулирования сводится к изменению длительности горения сигналов светофора в зависимости от интенсивности движения в каждом из направлений. Например, в направлении с заметно большей загруженностью в определенное время суток транспортным средствам предоставляется больше времени для проезда, а если ситуация изменится, приоритетным может стать конфликтующее направление или же регулирование будет осуществляться в равных пропорциях при соизмеримой загруженности.

Такой метод регулирования предусматривает наличие информации о характере транспортного потока в каждом направлении на входе системы управления, а сигналы о переключении фазы регулирования выступают в качестве управляющего воздействия. Предлагаемая в данной работе структурная схема системы интеллектуального управления транспортными потоками приведена на рисунке 3.1.

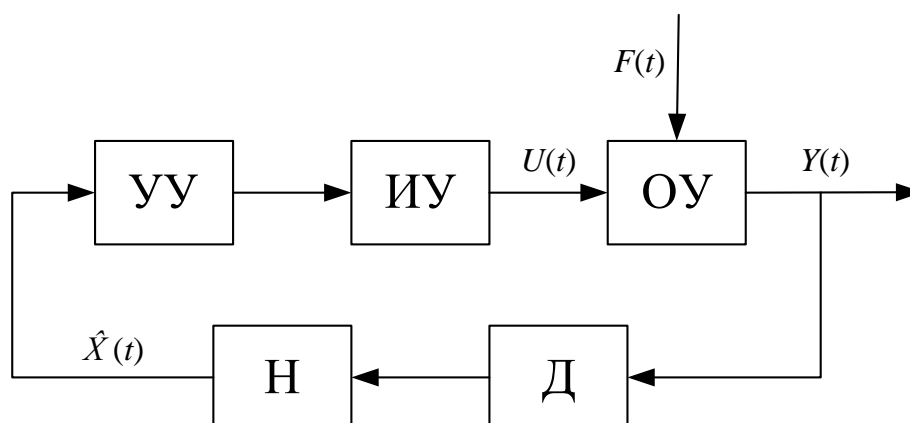


Рисунок 3.1 – Структурная схема системы интеллектуального
управления транспортными потоками на перекрёстке

На рисунке 3.1 приняты следующие условные обозначения:

УУ – управляющее устройство;

ИУ – исполнительное устройство – комплекс светофоров на перекрестке;

ОУ – объект управления – городской перекресток со светофорным регулированием;

Д – детектор транспорта, необходимый для фиксации количества ТС на подъездах к перекрестку;

Н – наблюдатель (модуль прогноза), необходимый для восстановления недостающих данных о состоянии объекта управления.

На рисунке 3.1 обозначены следующие векторы:

$$Y(t) = \begin{bmatrix} n_{11}^1(t) \\ \dots \\ n_{1j}^1(t) \\ \dots \\ n_{ij}^1(t) \\ \dots \\ n_{ij}^k(t) \\ m_{11}^1(t) \\ \dots \\ m_{1j}^1(t) \\ \dots \\ m_{ij}^1(t) \\ \dots \\ m_{ij}^k(t) \end{bmatrix}; \quad (3.1)$$

$$U(t) = \begin{bmatrix} \tau_K^1(t) \\ \tau_{Ж}^1(t) \\ \tau_3^1(t) \\ \tau_{3л}^1(t) \\ \tau_{3п}^1(t) \\ \dots \\ \tau_K^i(t) \\ \tau_{Ж}^i(t) \\ \dots \\ \tau_l^i(t) \end{bmatrix}; \quad (3.2)$$

$$F(t) = \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ \dots \\ q_i(t) \\ l_1(t) \\ l_2(t) \\ \dots \\ l_i(t) \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

$$\hat{X}(t) = \begin{bmatrix} n_{11}^1(t) \\ \dots \\ \hat{n}_{1j}^1(t) \\ \dots \\ \hat{n}_{ij}^k(t) \\ m_{11}^1(t) \\ \dots \\ m_{1j}^1(t) \\ \dots \\ m_{ij}^1(t) \\ \dots \\ m_{ij}^k(t) \end{bmatrix}; \quad (3.4)$$

$Y(t)$ – вектор выходных переменных (3.1). Состоит из переменных $n_{ij}^k(t)$ и $m_{ij}^k(t)$, где $n_{ij}^k(t)$ – количество ТС, подъезжающих к перекрестку, на котором осуществляется управление, в направлении k по полосе i на участке j . $m_{ij}^k(t)$ – количество ТС, отъезжающих от вышестоящего перекрестка в направлении k по полосе i на участке j . Участок – часть полосы между перекрестками, длина которого выбрана по определенным критериям учета транспорта. Количество направлений, полос движения и контролируемых участков зависит от конфигурации регулируемого перекрестка.

$\hat{X}(t)$ – вектор состояния (3.4), включающий в себя измеренные переменные вектора $Y(t)$, а также переменные, восстановленные при помощи наблюдателя – модуля прогноза. Таким образом, число контролируемых участков j может быть увеличено путем применения методов прогнозирования количества ТС на данных участках.

$U(t)$ – вектор управления (3.2). Содержит переменные управления каждым сигналом каждого светофора на перекрестке $\tau_l^i(t)$. Буквенный индекс l обозначает цвет сигнала: к – красный; ж – желтый; з – зеленый; зл – зеленый для движения налево; зп – зеленый для движения направо. Индекс i обозначает номер светофора, которым осуществляется управление. Набор сигналов и количество светофоров определяется конфигурацией регулируемого перекрестка.

$F(t)$ – вектор возмущения (3.3). Состоит из переменных $q_i(t)$ и $l_i(t)$, где $q_i(t)$ – интенсивность движения ТС в направлении i за пределами зоны обнаружения ТС вокруг перекрестка; $l_i(t)$ – фаза регулирования вышестоящего светофорного объекта в направлении i .

Соответствие описанных переменных схеме перекрестка представлено на рисунке 3.2.

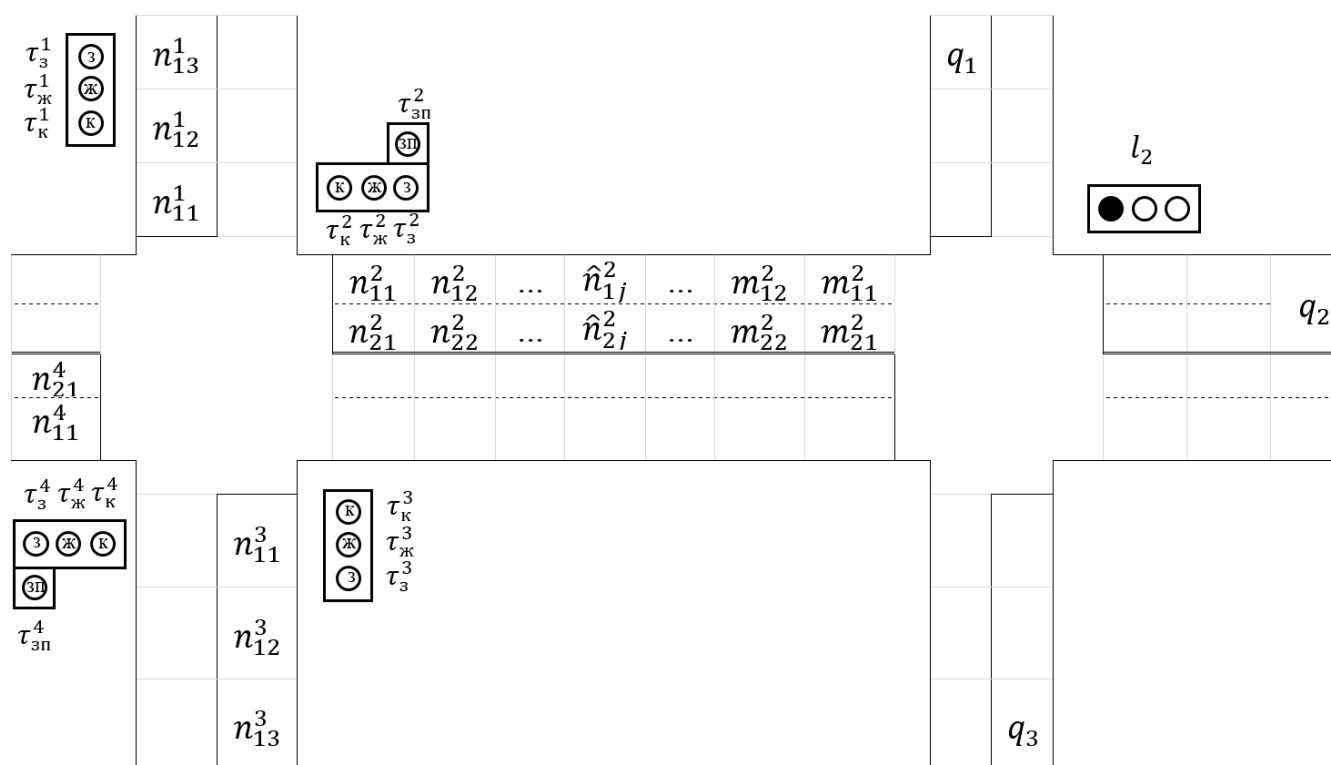


Рисунок 3.2 – Соответствие переменных системы управления
схеме регулируемого перекрестка

3.2 Разработка алгоритма управления на основе нечеткой логики

Принимая, что управление трафиком при помощи сигналов регулировщика является наиболее гибким и эффективным, стоит отметить, что сотрудник полиции при работе оперирует не значениями времени в секундах или других единицах, а принимает решение о смене фазы регулирования в каждый текущий момент времени на основе обратной связи, которая ограничена областью видимости человека в конкретных условиях.

Для реализации управления, максимально приближенного к действиям регулировщика, причем со значительным увеличением информативности оценки состояния транспортных потоков на подъездах к перекрестку, предлагается разделить зону дорожной сети вокруг перекрёстка на участки (рисунок 3.3) с присвоением номера каждому участку по степени его удаления от перекрёстка.

На каждом участке посредством технических средств обнаружения трафика производится фиксация количества ТС в текущий момент времени. Количество ТС

классифицируется категориями: «Мало машин» (S), «Средне машин» (M), «Много машин» (B) (GS , GM , GB в направлении разрешенного движения и, соответственно, RS , RM , RB в направлении скапливающейся очереди). Классифицированные данные о количестве ТС и номер участка, в котором данное количество зафиксировано, передаётся в систему нечеткого управления.

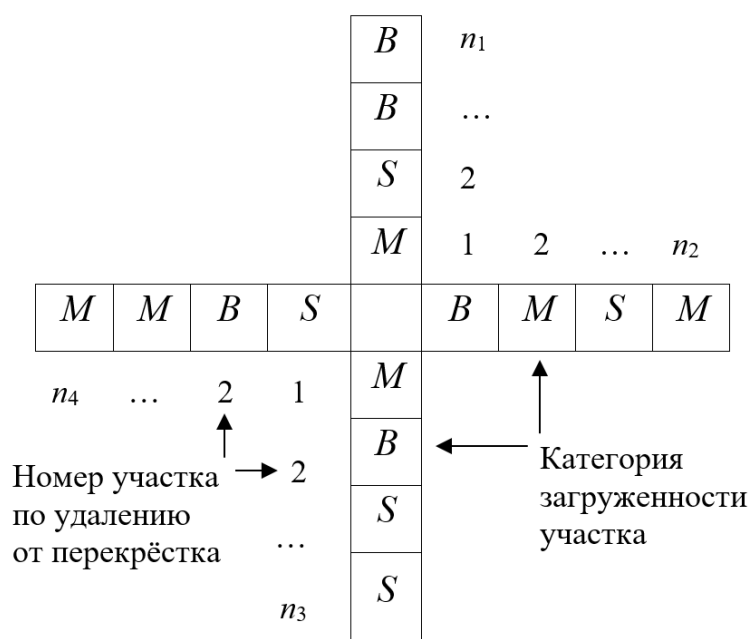


Рисунок 3.3 – Классификация входных данных системы управления

Входные нечеткие переменные системы – номера ближайших участков, в которых зафиксирована каждая категория количества ТС на стороне разрешенного движения и на стороне скапливающейся очереди. Если та или иная категория не была зафиксирована в зоне отслеживания трафика, на соответствующий ей вход поступает условный номер 100, указывающий на максимальное удаление данной категории от перекрёстка.

Выходная нечеткая переменная системы – уровень целесообразности переключения сигнала в текущий момент времени.

Взаимосвязь входов и выходов системы нечеткого управления приведена на рисунке 3.4.

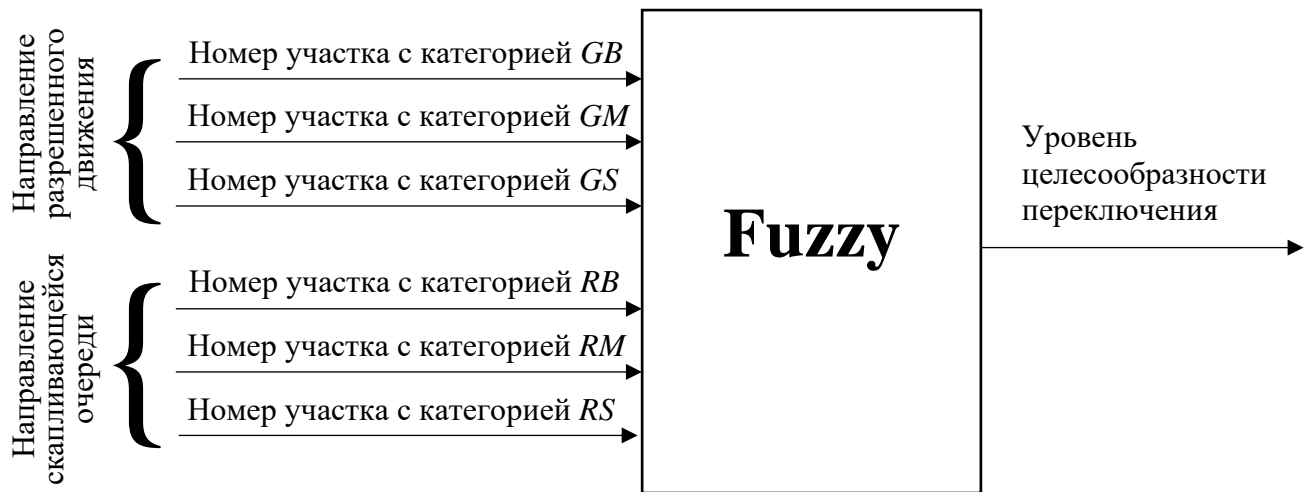


Рисунок 3.4 – Взаимосвязь входов и выходов системы нечеткого управления

Для ТС, в данный момент проезжающих на зеленый свет, фиксируется номер участка, в котором зафиксировано ближайшее появление каждой категории:

GB – «Много машин»;

GM – «Средне машин»;

GS – «Мало машин».

Для ТС, в данный момент стоящих в очереди на красный свет, фиксируется номер участка, в котором зафиксировано ближайшее появление каждой категории:

RB – «Много машин»;

RM – «Средне машин»;

RS – «Мало машин».

Каждая входная переменная описывается тремя термами, фаззифицирующими номер участка с данным числом ТС относительно перекрёстка: «Близко» (C), «Средне» (M) и «Далеко» (F). Например, если группа ТС категории «Много машин» встречается во 2 участке, система классифицирует номер участка как «Близко».

Функции принадлежности входных переменных «Средне машин» и «Мало машин» по обоим направлениям транспортного потока (GS, RS, GM, RM) выглядят следующим образом (рисунки 3.5, 3.6).

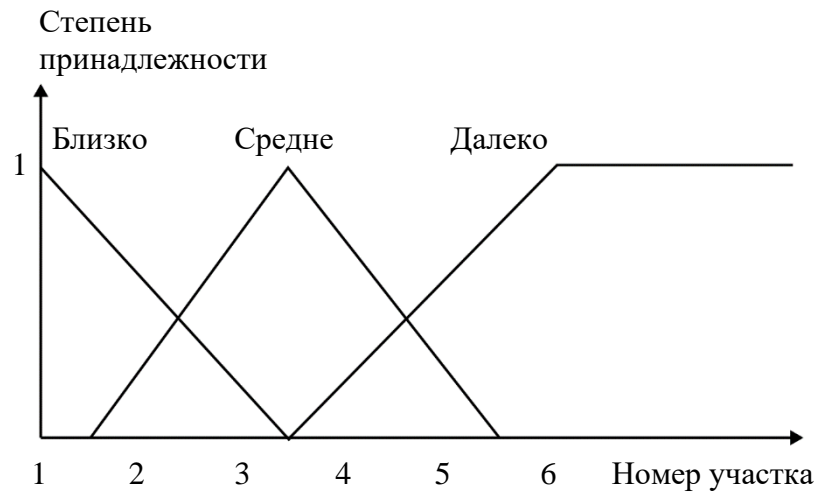


Рисунок 3.5 – Функции принадлежности входных переменных «Мало машин» (GS, RS)

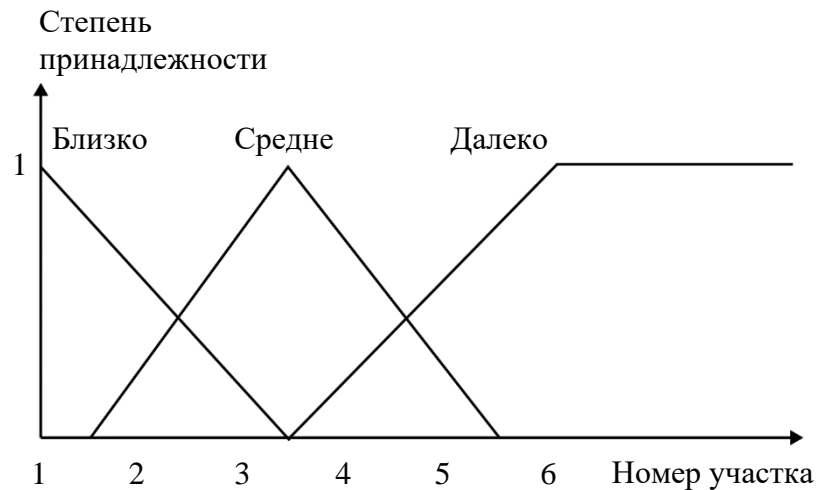


Рисунок 3.6 – Функции принадлежности входных переменных «Средне машин» (GM, RM)

Функции принадлежности входных переменных «Много машин» (GB, RB) для обоих направлений потока ТС имеют трапецевидную форму для терма «Близко», так как большее число подъезжающих к перекрестку ТС требует более быстрой реакции управления (рисунок 3.7).

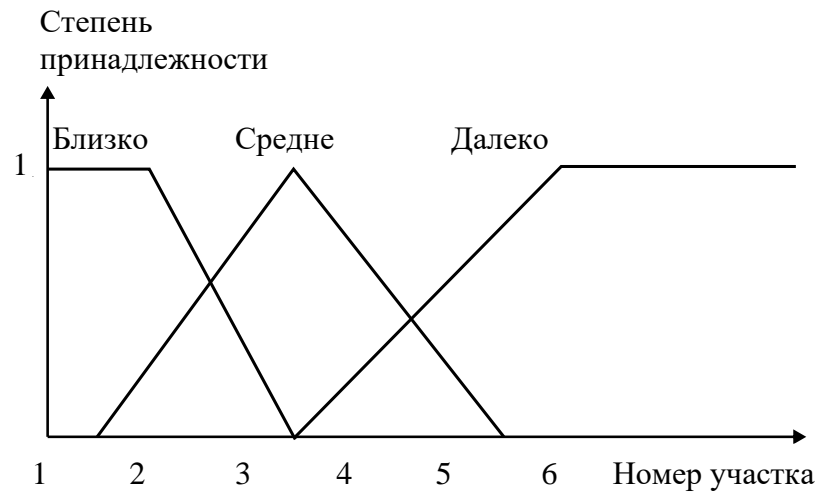


Рисунок 3.7 – Функции принадлежности входных переменных «Много машин» (GB , RB)

Выходная переменная имеет пять термов, характеризующих уровень целесообразности переключения сигнала в текущий момент времени: «Низкий» (L), «Скорее низкий» (AL), «Средний» (M), «Скорее высокий» (AH), «Высокий» (H) (рисунок 3.8).

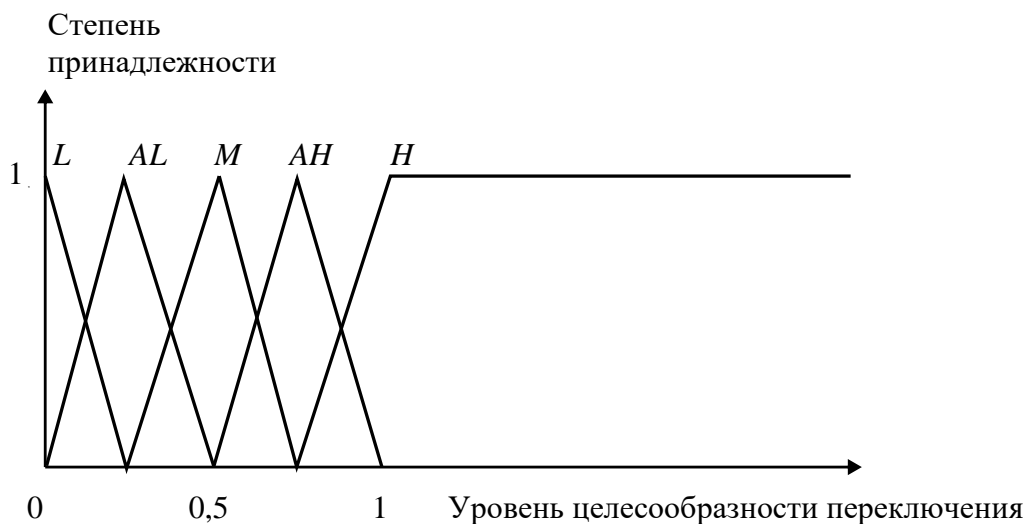


Рисунок 3.8 – Функции принадлежности выходной переменной

После дефазификации выходной переменной переключение сигнала осуществляется, если уровень целесообразности переключения превышает значение 0,5. В противном случае продолжается текущая фаза регулирования.

Для сочетаний термов каждой входной переменной формулируется логика управления. Ниже приведены некоторые из нечетких правил системы управления. Полный перечень правил приведен в приложении А.

Если «Много машин» на зеленый «Близко» и «Мало машин» на зеленый «Далеко» и «Средне машин» на красный «Близко» и «Мало машин» на красный «Средне», то целесообразность переключения «Скорее низкая» ($GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RM=C \ \& \ RS=M \rightarrow T=AL$).

Если «Средне машин» на зеленый «Средне» и «Мало машин» на зеленый «Близко» и «Средне машин» на красный «Средне» и «Мало машин» на красный «Близко», то целесообразность переключения «Средняя» ($GM=M \ \& \ GS=C \ \& \ RM=M \ \& \ RS=C \rightarrow T=M$).

Если «Средне машин» на зеленый «Далеко» и «Мало машин» на зеленый «Близко» и «Много машин» на красный «Близко» и «Мало машин» на красный «Далеко», то целесообразность переключения «Высокая» ($GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RB=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$).

3.2.1 Определение параметров системы управления

Стоит отметить, что в системе управления должны быть установлены ограничения по минимальной и максимальной длительности фаз регулирования.

На практике минимальная длительность фазы светофорного регулирования при наличии пешеходного перехода определяется по формуле (3.5) [98]:

$$t_{min} = 5 + \frac{B_{пш}}{V_{пш}}, \quad (3.5)$$

где t_{min} – длительность фазы регулирования для движения пешеходов;

$B_{пш}$ – ширина проезжей части в месте пешеходного перехода;

$V_{пш}$ – средняя скорость пешехода (обычно принимается равной 1,3 м/с);

Так, при ширине проезжей части 10 м минимальная длительность фазы регулирования, предусматривающей движение пешеходов, составляет 13 с. При ширине проезжей части 15 м длительность такой фазы составляет 17 с.

Максимальная длительность фазы регулирования, как правило, не должна превышать значение в 120 с. В противном случае, как показывает практика, участники движения могут посчитать систему неисправной и двигаться, пренебрегая сигналами светофора.

В связи с этим минимальная длительность фазы регулирования после переключения сигнала рассчитывается по формуле (3.5) для каждого направления движения на каждом отдельном перекрестке, а максимальная длительность фазы принимается равной 120 с. Таким образом, система управления подаст сигнал о целесообразности переключения фазы не ранее чем через минимально допустимое время после смены предыдущей фазы регулирования, а в случае, если условий для переключения сигнала не возникает дольше 120 с, смена фазы произойдет автоматически без учета ситуации на проезжей части.

Требуется обоснования также вопрос о том, на каком расстоянии до перекрестка следует вести обнаружение ТС для достижения наиболее эффективного регулирования. Предполагается, что радиус обнаружения ТС должен быть таким, чтобы при переключении фазы регулирования на минимальную длительность системой были зафиксированы все ТС, движение которых будет нарушено. Например, если в текущий момент времени произойдет переключение сигнала на 15 с, это повлияет на движение ТС, которые должны были пересечь перекресток в следующие 15 с. Длина проезжей части, на которой находятся данные ТС, может быть определена по формуле (3.6).

$$l_{\text{обн.}} = t_{\text{min}} \cdot V_{\text{max}}, \quad (3.6)$$

где $l_{\text{обн.}}$ – дальность обнаружения ТС, м;

t_{min} – минимальная длительность следующей фазы регулирования, с;

V_{max} – ограничение максимальной скорости на данном участке, м/с.

Так, при минимальной длительности фазы регулирования 15 с и ограничении скорости 60 км/ч (16,67 м/с) длина участка проезжей части, на которой отслеживается транспортный поток, составляет 250 м.

Каждый терм при фаззификации значений входных переменных системы включает несколько участков. Так как количество ТС внутри участка классифицируется тремя категориями («Мало машин», «Средне машин», «Много машин»), длина участка должна быть достаточно большой, чтобы количество находящихся на нем ТС можно было описать тремя категориями, но при этом настолько малой, чтобы зона обнаружения ТС включала в себя как можно большее количество участков. Это необходимо для достижения бóльшей дискретизации степени принадлежности номера участка к нечетким множествам, а следовательно, повышения чувствительности управления. Данные рассуждения подтверждены модельным экспериментом. Для условного перекрестка с зоной обнаружения трафика, равной 172 м до стоп-линий, область обнаружения разделяется тремя способами: на 2 участка длиной 86 м; на 3 участка длиной 57 м; на 4 участка длиной 43 м. Категории количества ТС на участке приведены в таблице 3.1. Результаты эксперимента представлены в таблице 3.2. Таким образом, наилучшее качество управления соответствует случаю с разделением проезжей части на большее количество участков малой длины.

Таблица 3.1 – Различные варианты настройки системы управления

Количество и длина участков	«Мало», автомобилей	«Средне», автомобилей	«Много», автомобилей.
2 × 86 м	0–3	4–6	>8
3 × 57 м	0–2	3–5	>6
4 × 43 м	0–1	2–4	>4

Таблица 3.2 – Результаты работы системы управления с различными настройками

Количество и длина участков	Среднее время ожидания, с	Средняя длина очереди, автомобилей
2 × 80 м	6,79	0,48
3 × 53 м	6,48	0,44
4 × 40 м	4,50	0,38

Исходя из приведенных выше соображений, минимальной допускается длина участка, способная вместить 6 легковых (или приведенных к легковым) ТС. Учитывая, что средняя длина легкового автомобиля составляет 4,2 м, а безопасная дистанция между ТС – порядка 3 м, минимальную длину участка обнаружения можно рассчитать по формуле (3.7). Стоит заметить, что количество ТС на участке, равное 6, достигается, как правило, в условиях очереди. Таким образом, при свободном движении система работает с категориями «Мало машин» и «Средне машин», а категория «Много машин» описывает состояние очереди.

$$l_{\text{уч. min}} = (4,2 + 3) \cdot 6 = 43,2 \text{ м} \quad (3.7)$$

3.2.2 Разработка подсистем управления включением фазы регулирования для безопасного левого поворота

При управлении транспортными потоками на перекрестках часто необходимо задействовать третью фазу регулирования, которая обеспечивает безопасный левый поворот ТС в случаях, если интенсивность движения в этом направлении достаточно велика. Фазы регулирования, обеспечивающие безопасный левый поворот, предполагают различные схемы разъезда ТС для дорог с одной и с несколькими полосами движения в одном направлении [3, с. 49] (рисунок 3.9).

Включение третьей фазы регулирования может быть реализовано путём внедрения подсистемы нечеткой системы управления, которая работает во время основной фазы регулирования, разрешающей движение в данном направлении. Взаимосвязь входов и выходов подсистемы нечеткого управления для включения фазы безопасного левого поворота на дороге с одной полосой движения в одном направлении проиллюстрирована на рисунке 3.10.

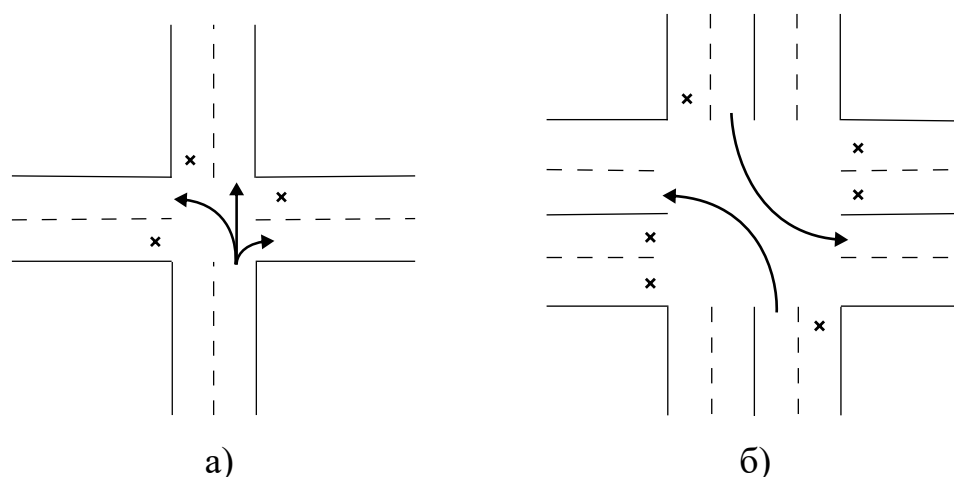


Рисунок 3.9 – Схема разъезда ТС во время фазы регулирования для безопасного левого поворота:

- а) на дорогах с одной полосой движения в одном направлении;
- б) на дорогах с двумя и более полосами движения в одном направлении

Количество ТС

в зоне обнаружения:

в направлении
север-юг (NS)

в направлении
юг-север (SN)



Целесообразность
включения третьей фазы
регулирования (T)

Рисунок 3.10 – Взаимосвязь входов и выходов подсистемы нечеткого управления для включения фазы безопасного левого поворота на дороге с одной полосой движения в одном направлении

На входе подсистемы нечеткого управления для включения фазы безопасного левого поворота на дороге с одной полосой движения в одном направлении – количество ТС в зоне обнаружения детектора транспорта для двух встречных направлений, например, север-юг и юг-север. Количество ТС фазифицируется тремя термами: «Мало машин» (S), «Средне машин» (M) и «Много машин» (B). Функции принадлежности входных нечетких переменных представлены на рисунке 3.11.

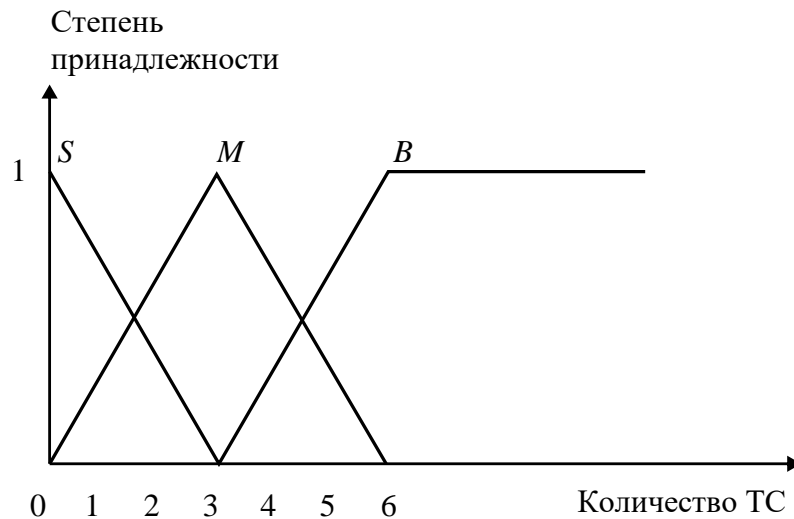


Рисунок 3.11 – Функции принадлежности входных нечетких переменных подсистемы управления для безопасного левого поворота

Выходная переменная подсистемы – целесообразность включения третьей фазы регулирования – также описывается тремя термами: NS – включение третьей фазы целесообразно в направлении север-юг; Z – включение третьей фазы нецелесообразно; SN – включение третьей фазы целесообразно в направлении юг-север. Функции принадлежности выходной нечеткой переменной представлены на рисунке 3.12.

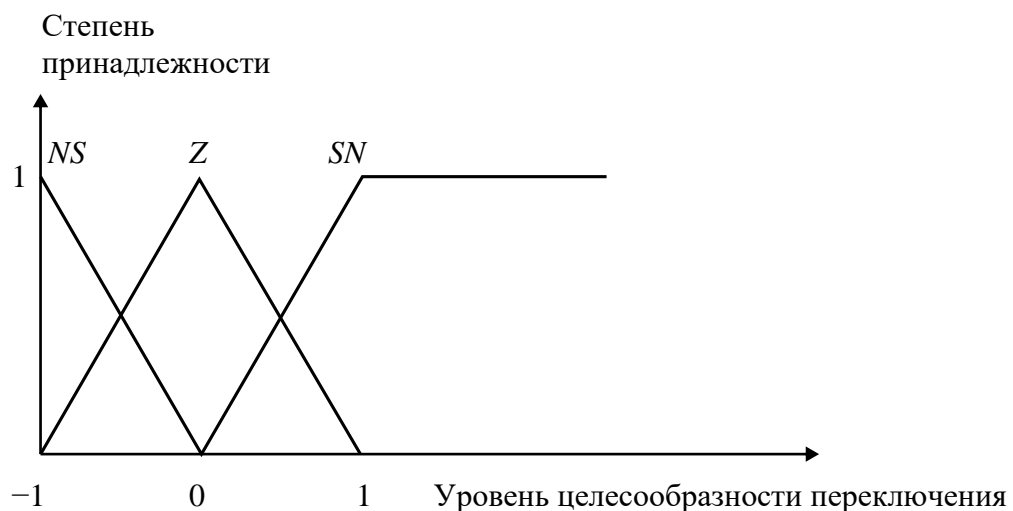


Рисунок 3.12 – Функции принадлежности выходной нечеткой переменной подсистемы управления для безопасного левого поворота для дорог с одной полосой движения в одном направлении

После дефаззификации выходная переменная может принимать значения от -1 до 1 . На основании этого принимается решение: если её значение находится в диапазоне от -1 до $-0,3$, то третью фазу регулирования необходимо включить для направления север-юг; если от $-0,3$ до $0,3$ – включение третьей фазы нецелесообразно; если от $0,3$ до 1 – третью фазу регулирования необходимо включить для направления юг-север.

Подсистема нечеткого управления для включения фазы безопасного левого поворота на дорогах с одной полосой движения в одном направлении оперирует следующими нечеткими правилами:

$$SN = S \ \& \ NS = S \rightarrow T = Z;$$

$$SN = S \ \& \ NS = M \rightarrow T = NS;$$

$$SN = S \ \& \ NS = B \rightarrow T = NS;$$

$$SN = M \ \& \ NS = S \rightarrow T = SN;$$

$$SN = M \ \& \ NS = M \rightarrow T = Z;$$

$$SN = M \ \& \ NS = B \rightarrow T = NS;$$

$$SN = B \ \& \ NS = S \rightarrow T = SN;$$

$$SN = B \ \& \ NS = M \rightarrow T = SN;$$

$$SN = B \ \& \ NS = B \rightarrow T = Z.$$

Подсистема управления для безопасного левого поворота включается во время основной фазы регулирования, разрешающей движение в данном направлении. По истечении минимальной длительности основной фазы при помощи подсистемы управления принимается решение о целесообразности включения третьей фазы и о направлении, из которого она разрешает левый поворот. В то же время основная система управления принимает решение о переключении основной фазы регулирования для конфликтующего направления движения. В случае, если решение о переключении основной фазы принято раньше, третья фаза в данном цикле регулирования не включается. Если же раньше принято решение о включении третьей фазы, она действует в течение минимального допустимого времени, после чего снова принимается решение о переключении.

В случае реализации третьей фазы регулирования на дорогах с двумя и более полосами движения в одном направлении выполнение безопасного левого поворота возможно одновременно из встречных направлений (рисунок 3.9, б) с разъездом «правым бортом», однако с ограничением движения в прямом направлении. Взаимосвязь входов и выходов подсистемы нечеткого управления для включения фазы безопасного левого поворота на дороге с двумя и более полосами движения в одном направлении проиллюстрирована на рисунке 3.13.

Максимальное количество ТС в зоне обнаружения по полосам обоих направлений:



Рисунок 3.13 – Взаимосвязь входов и выходов подсистемы нечеткого управления для включения фазы безопасного левого поворота на дороге с двумя и более полосами движения в одном направлении

В данном случае на первый вход подсистемы управления поступает информация о максимальном количестве ТС в зоне обнаружения детектора транспорта по левой полосе движения для обоих направлений. На второй вход – о максимальном количестве ТС в зоне обнаружения детектора транспорта по остальным полосам движения для обоих направлений. Функции принадлежности входных переменных аналогичны варианту подсистемы управления для дорог с одной полосой движения в одном направлении (рисунок 3.11).

Выходная нечеткая переменная подсистемы управления – целесообразность включения третьей фазы регулирования. Имеет три терма: Lo – низкий уровень целесообразности; M – средний уровень; H – высокий уровень. Функции принадлежности выходной переменной подсистемы управления для дорог с двумя и более полосами движения в одном направлении приведены на рисунке 3.14.

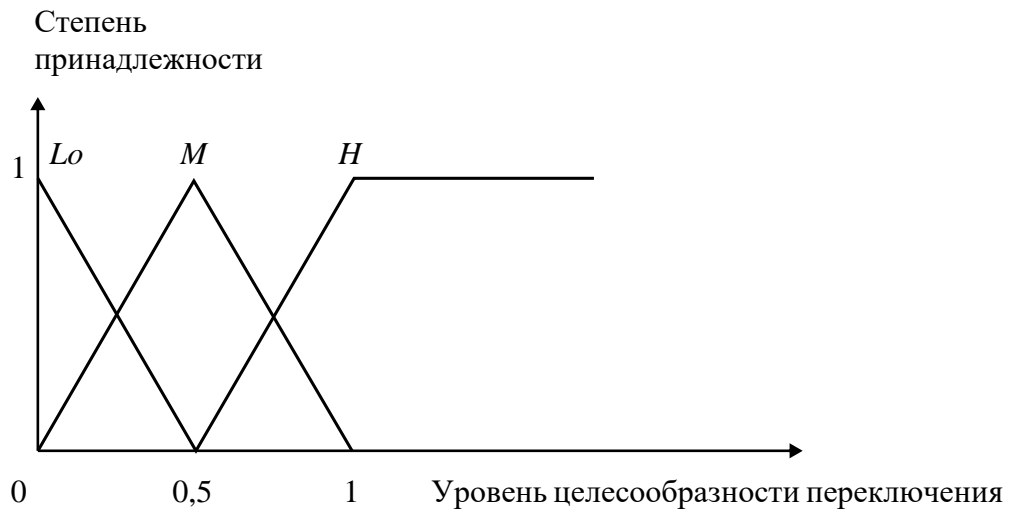


Рисунок 3.14 – Функции принадлежности выходной нечеткой переменной подсистемы управления для безопасного левого поворота для дорог с двумя и более полосами движения в одном направлении

После дефаззификации значение выходной переменной находится в пределах от 0 до 1. При значении $T \geq 0,5$ включается третья фаза регулирования, в противном случае продолжается текущая основная фаза.

Подсистема управления для дорог с двумя и более полосами движения в одном направлении оперирует следующими нечеткими правилами:

$$R = S \ \& \ Le = S \rightarrow T = Lo;$$

$$R = S \ \& \ Le = M \rightarrow T = H;$$

$$R = S \ \& \ Le = L \rightarrow T = H;$$

$$R = M \ \& \ Le = S \rightarrow T = Lo;$$

$$R = M \ \& \ Le = M \rightarrow T = M;$$

$$R = M \ \& \ Le = L \rightarrow T = M;$$

$$R = L \ \& \ Le = S \rightarrow T = Lo;$$

$$R = L \ \& \ Le = M \rightarrow T = Lo;$$

$$R = L \ \& \ Le = L \rightarrow T = M.$$

Принцип работы подсистемы управления для безопасного левого поворота на дорогах с двумя и более полосами движения в одном направлении аналогичен варианту подсистемы управления для одной полосы движения в одном

направлении. По истечении минимальной длительности основной фазы при помощи подсистемы принимается решение о целесообразности включения третьей фазы регулирования. В то же время основная система управления принимает решение о переключении основной фазы регулирования для конфликтующего направления. В случае, если решение о переключении основной фазы будет принято раньше, третья фаза в данном цикле регулирования не включается. Если же первым принято решение о включении третьей фазы, она действует в течение минимального допустимого времени, после чего снова принимается решение о переключении.

3.3 Моделирование и анализ качества управления

Оценка качества управления модифицированной системы и её сравнение с системой «жесткого» управления светофорными объектами и системой нечеткого управления Я. Нииттимаки осуществляется посредством компьютерного моделирования. Схемы моделирования отдельного перекрестка представлены на рисунках 3.15–3.17.

На рисунке 3.15 изображена общая схема модели отдельного перекрестка двух дорог. Движение ТС осуществляется по четырем направлениям. Блоки «ЗВ», «ВЗ», «СЮ», «ЮС» описывают движение ТС через стоп-линию в каждом из направлений. Блок «Управление» содержит модель системы управления перекрестком. На его входы поступает информация о количестве ТС с детекторов транспорта. На выходах – формируются векторы сигналов управления светофорами по каждому направлению движения, а также статистическая информация о длительности каждой фазы регулирования. На входы «приб» блоков «ЗВ», «ВЗ», «СЮ», «ЮС» поступает транспортный поток, прибывающий к перекрестку. На вход «свет» подаются сигналы управления светофорами от системы управления. С выходов «стат» собираются статистические данные о показателях качества управления; выход «счёт» содержит информацию о количестве ТС, собранную при помощи детекторов транспорта; выход «отпр»

предназначен для пропуска транспортного потока после пересечения стоп-линии. Блоки «Сравнение» предназначены для сравнения количества ТС, движущихся параллельно в течение одной фазы регулирования (по разным полосам движения или во встречных направлениях). В результате сравнения на вход системы подается информация о большем количестве ТС из сравниваемых направлений согласно принципу работы системы.

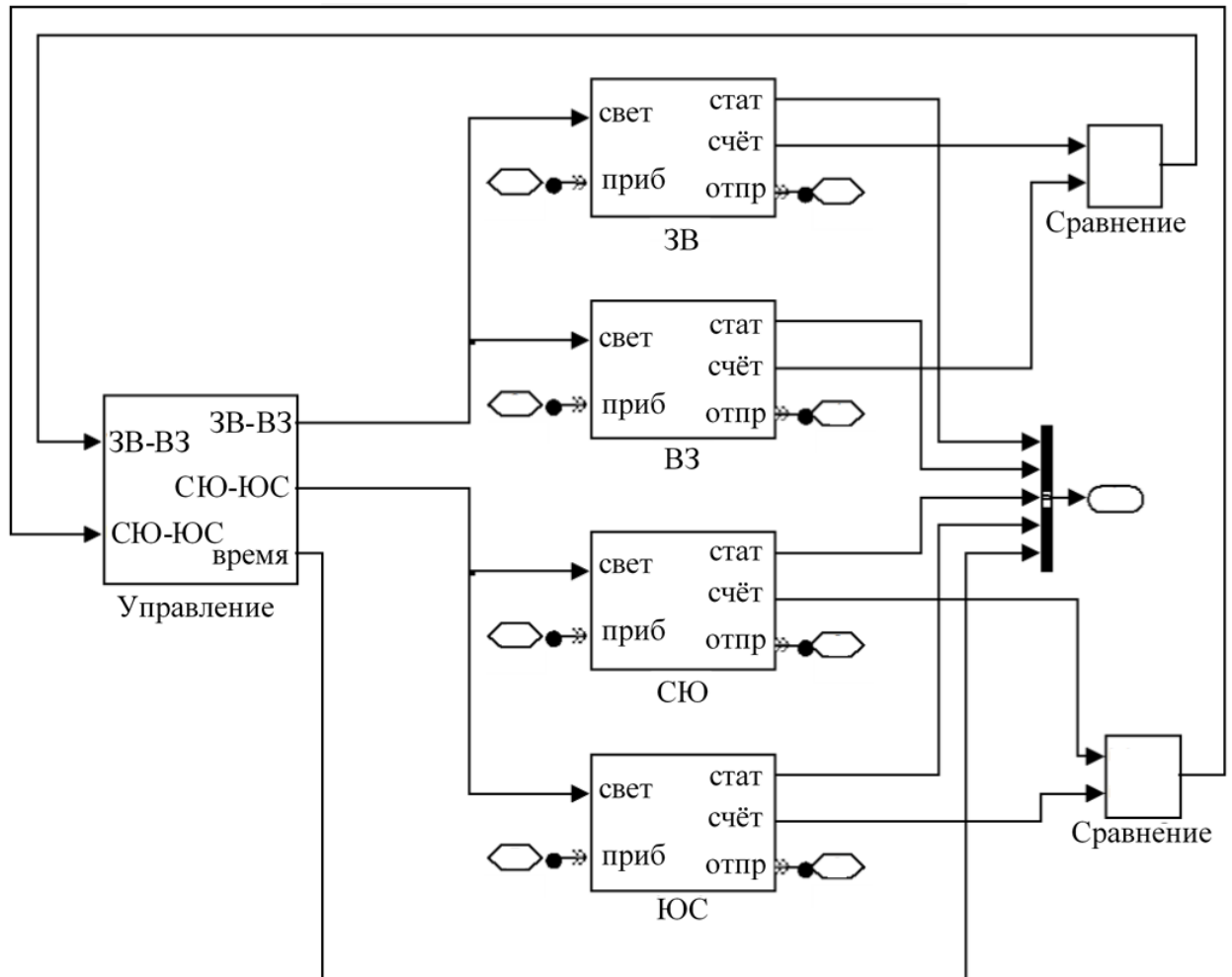


Рисунок 3.15 – Общая схема модели отдельного перекрестка

Блоки «3В», «ВЗ», «СЮ», «ЮС» содержат описание движения ТС в одном направлении (рисунок 3.16). Транспортный поток проходит через блок «Участки», в котором производится подсчет ТС на каждом участке дороги на подъезде к перекрестку согласно принципу работы системы. Далее ТС попадают в блок «Шлюз», который разрешает или ограничивает движение в зависимости от сигнала

светофора, поступающего на вход «вкл» от системы управления. После прохождения шлюза ТС попадают в блок «Сервер», который отвечает за задержку ТС при проезде перекрестка. Время задержки рассчитывается с учетом длины очереди и поступает на вход «время» блока «Сервер».

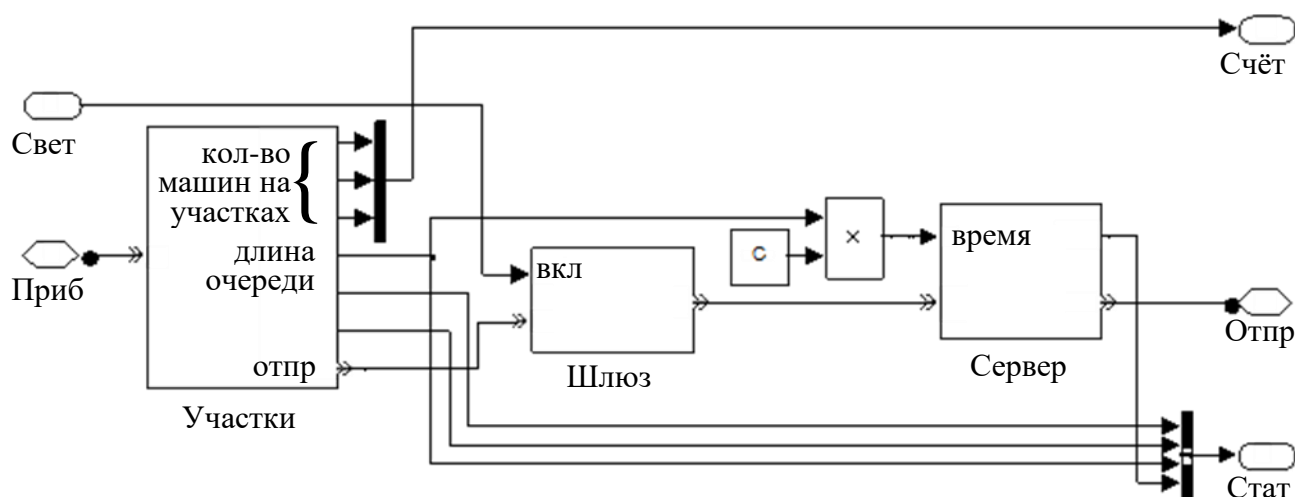


Рисунок 3.16 – Модель движения ТС в одном направлении

Блоки «Перекрёсток» (рисунок 3.17) для связи с соседними перекрестками принимают сигналы, отражающие поток ТС по каждому направлению движения на перекрестке, и формируют аналогичные сигналы на выходе. ТС поступают на вход блока по связям с соседними перекрестками, а в случае, если перекресток находится на границе области моделирования или же функционирует изолированно, транспортный поток генерируется в блоке «Генератор» исходя из интенсивности движения в конкретном случае. Блок «Очередь» позволяет указать начальное количество ТС в очереди при старте моделирования. После пересечения стоп-линии ТС покидают блок «Перекрёсток» и проходят через блоки «Разветвитель», которые направляют определенную долю ТС для левого или правого поворота и реализуют задержку при выполнении данных манёвров. Доля ТС, выполняющих поворот, и время его выполнения определяются индивидуально для каждого перекрестка путем сбора статистических данных. Блок «Соединитель» объединяет транспортные потоки, поступающие с прямого и поворотных направлений, в один поток, который поступает на блок «Трансфер». Он реализует

задержку ТС – время, необходимое для проезда участка дороги между перекрестками. Оно зависит от длины данного участка и ограничения скорости на нём. Далее ТС поступают на вход следующего по ходу движения перекрёстка.

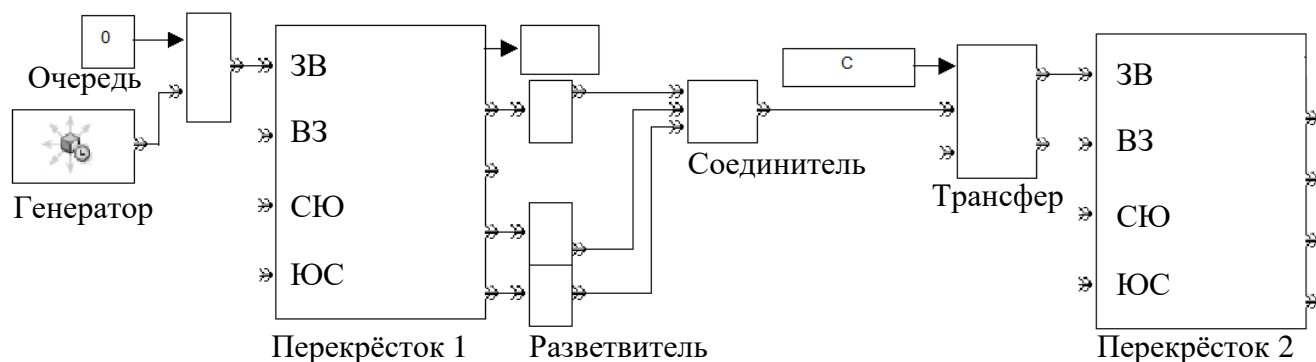


Рисунок 3.17 – Схема связи перекрестка с соседними перекрестками

Для проверки универсальности предложенной системы её модельное тестирование проведено для ряда перекрестков как г. Донецк (рисунок 3.18), так и г. Ростов-на-Дону (рисунок 3.19).

Эмпирически определены параметры каждого перекрестка:

- количество полос движения в каждом направлении;
- интенсивность прибытия ТС на перекресток по каждой полосе;
- интенсивность разъезда ТС с перекрестка по каждой полосе;
- доля ТС, осуществляющих левый и правый поворот;
- время, затрачиваемое одним ТС на выполнение левого и правого поворотов.

При моделировании светофорных объектов приняты следующие допущения:

- движение автомобилей осуществляется согласно правилам дорожного движения;
- отсутствуют аварийные и другие нештатные ситуации;
- движение по выделенным полосам для общественного транспорта исключается из рассмотрения;
- движение осуществляется при наиболее благоприятных погодных условиях;
- возможность обгона в модели не реализована.

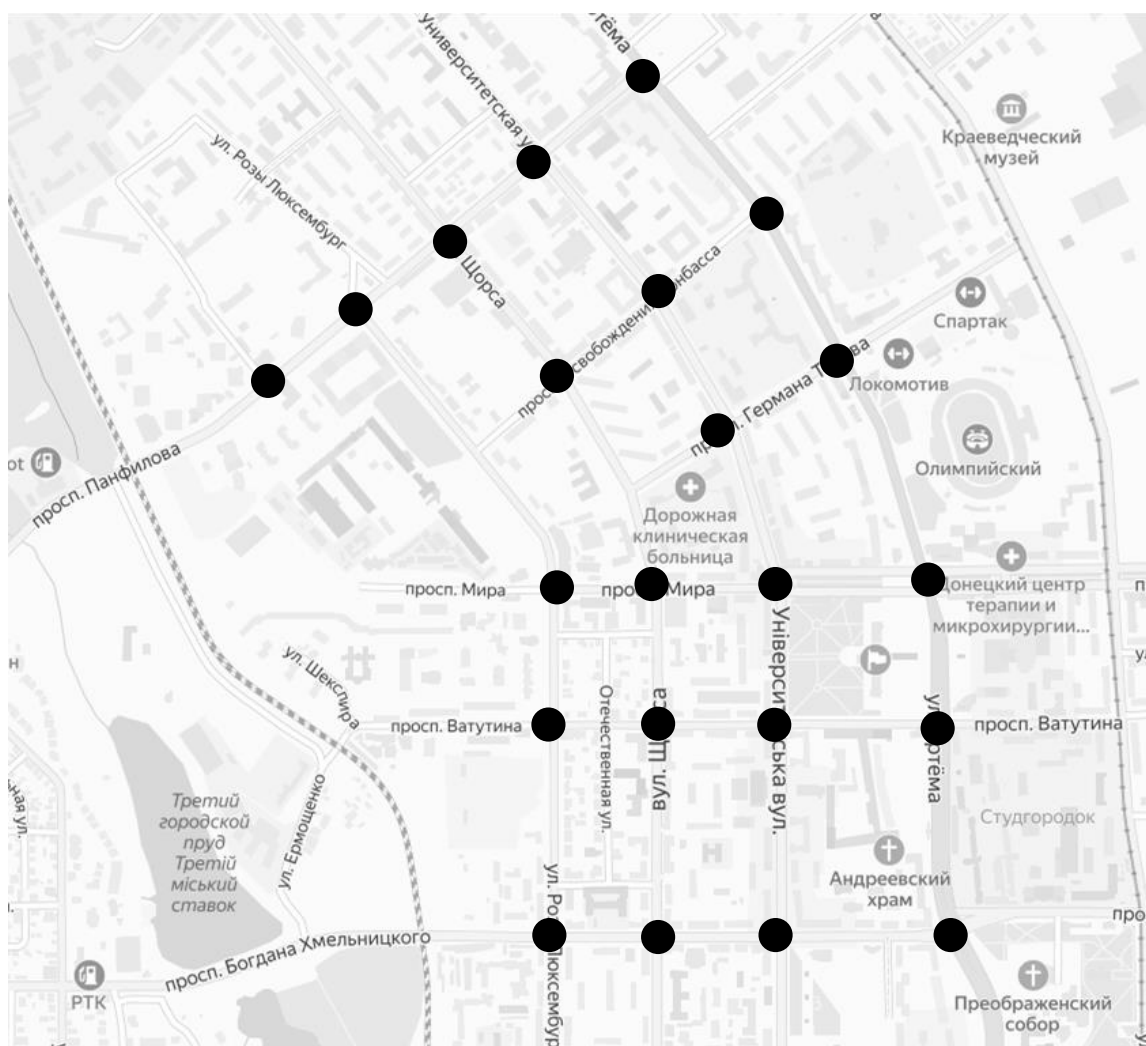


Рисунок 3.18 – Схема моделируемого участка дорожной сети в г. Донецк

С целью выявления особенностей работы системы в различных условиях движения моделируемые перекрестки классифицированы по следующим параметрам:

- средняя интенсивность движения между утренним и вечерним часами-пик (8:00–19:00) в диапазонах 0,10...0,20 авт./с, 0,15...0,25 авт./с, 0,20...0,30 авт./с в зависимости от перекрестка;
- коэффициент неравномерности транспортного потока в диапазонах 0,9...1,1 (поток, близкий к равномерному), 1,1...1,3 (средняя степень неравномерности, наиболее распространенная в условиях города), 1,3...1,5 (ярко выраженная неравномерность, возможная при низкой интенсивности движения).

Скорость транспортного потока между перекрестками описывается известной в литературе моделью следования за лидером (3.8), в которой ускорение

следующего автомобиля изменяется пропорционально разности скоростей между ним и предыдущим автомобилем.

$$\dot{v}_n(t) = \frac{1}{\tau} (v_{n-1}(t) - v_n(t)), \quad (3.8)$$

где $v_n(t)$ – скорость рассматриваемого автомобиля;

$v_{n-1}(t)$ – скорость предыдущего автомобиля;

τ – время реакции водителя, $\tau \approx 1,3$ с.

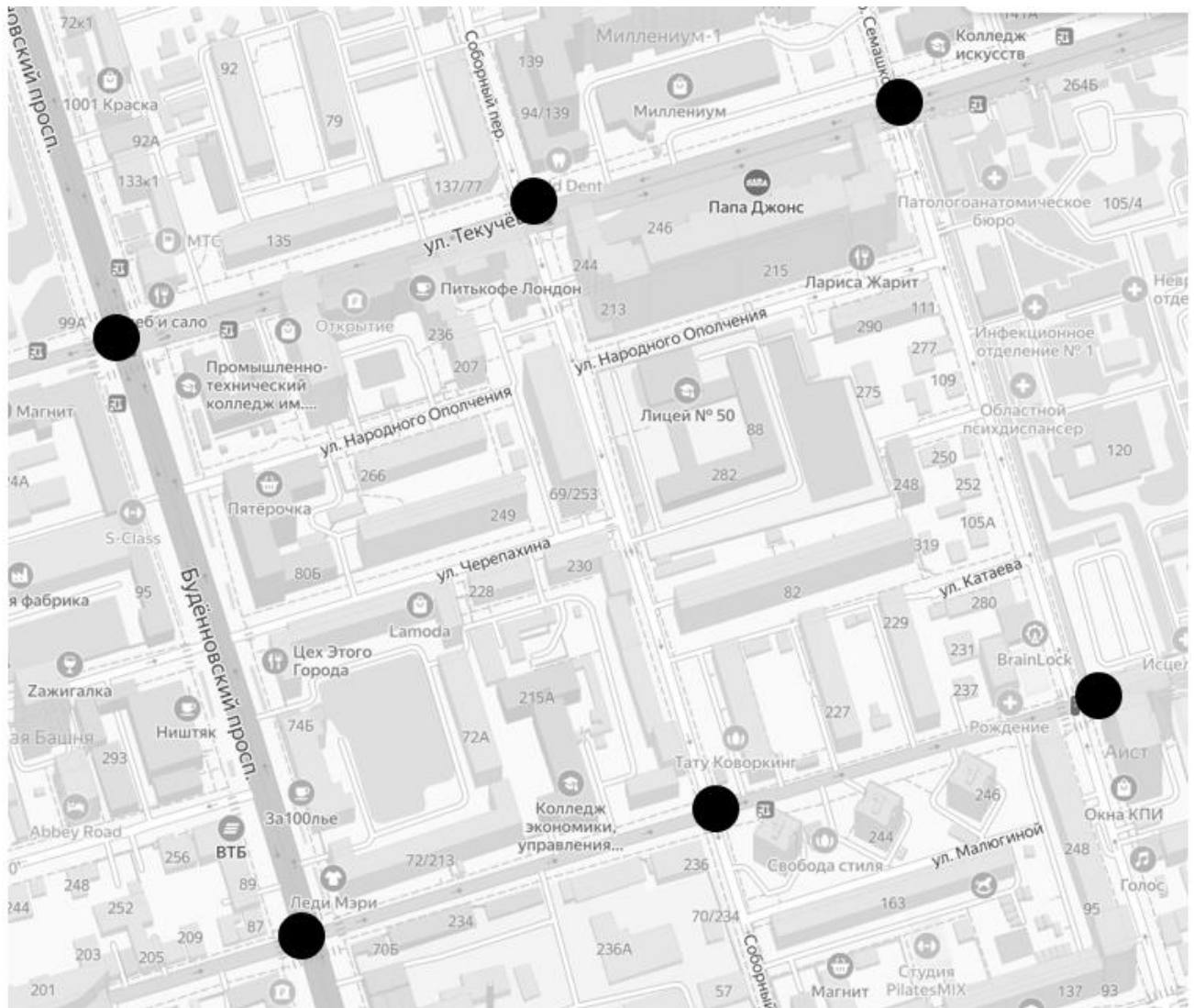


Рисунок 3.19 – Схема моделируемого участка
дорожной сети в г. Ростов-на-Дону

Моделирование осуществляется в течение 10 000 с. Оценка качества управления производится по двум показателям, принятым в теории массового обслуживания: среднее время ожидания и средняя длина очереди. В сравнении участвуют три системы:

1) система «жесткого» светофорного регулирования, в настоящее время реализованная на улицах г. Донецк и г. Ростов-на-Дону;

2) система нечеткого управления, разработанная финскими учеными под руководством Яркко Нииттимаки;

3) модифицированная система нечеткого управления, представленная в данной работе.

Результаты моделирования по каждому направлению движения на каждом перекрестке приведены в приложении Б. В колонках, отображающих результаты моделирования для систем нечеткого управления рядом со значением параметра приведено его изменение относительно системы «жесткого» регулирования в процентном выражении.

По результатам моделирования выделены наиболее характерные типы перекрестков со следующими параметрами, показатели качества управления на которых различны:

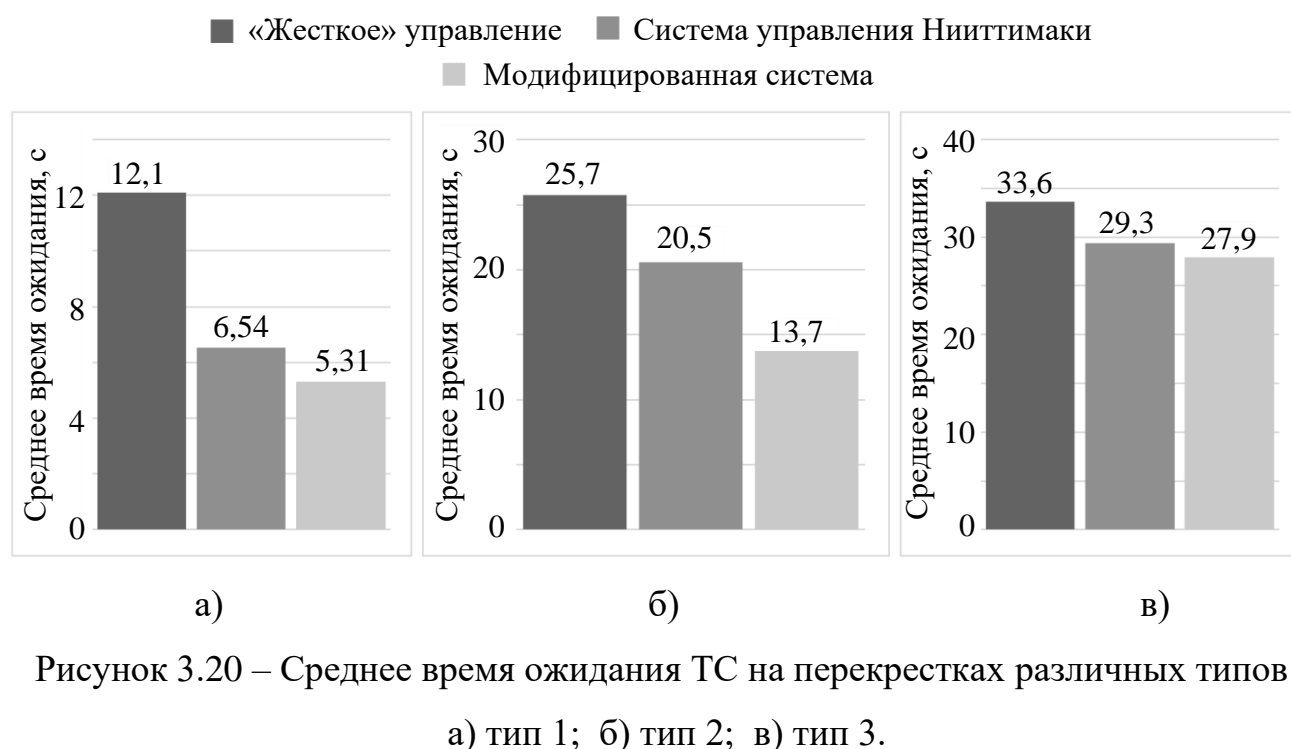
1) перекрестки с интенсивностью движения в диапазоне 0,10...0,20 авт./с и коэффициентом неравномерности потока в диапазоне 1,3...1,5;

2) перекрестки с интенсивностью движения в диапазоне 0,15...0,25 авт./с и коэффициентом неравномерности потока в диапазоне 1,1...1,3;

3) перекрестки с интенсивностью движения в диапазоне 0,20...0,30 авт./с и коэффициентом неравномерности потока в диапазоне 0,9...1,1.

Для перекрестков первого типа модифицированная система управления показала повышение эффективности управления на 56 % по среднему времени ожидания и средней длине очереди по сравнению с «жестким» управлением и на 11 % по сравнению с системой Я. Нииттимаки. Для перекрестков второго типа модифицированная система управления показала повышение эффективности управления на 46 % по сравнению с «жестким» управлением и, соответственно, на

26 % по сравнению с системой Я. Ниитимаки. Для перекрестков третьего типа модифицированная система управления показала повышение эффективности управления на 17 % по сравнению с «жестким» управлением и на 5 % по сравнению с системой Я. Ниитимаки. Таким образом, модифицированная система управления показывает наибольшую эффективность при использовании на перекрестках с интенсивностью движения в диапазоне 0,15...0,25 авт./с и коэффициентом неравномерности потока в диапазоне 1,1...1,3. Обобщая данные показатели для всех исследуемых перекрестков, модифицированная система управления по сравнению с «жестким» управлением показала среднее повышение эффективности управления на 39 %, по сравнению с системой управления Я. Ниитимаки – на 13 % по обоим показателям. Сравнительные гистограммы показателей качества исследуемых систем представлены на рисунках 3.20, 3.21.



Диаграммы функционирования систем «жесткого» и интеллектуального управления, а также качество светофорного регулирования при использовании данных систем проиллюстрированы на рисунке. 3.22

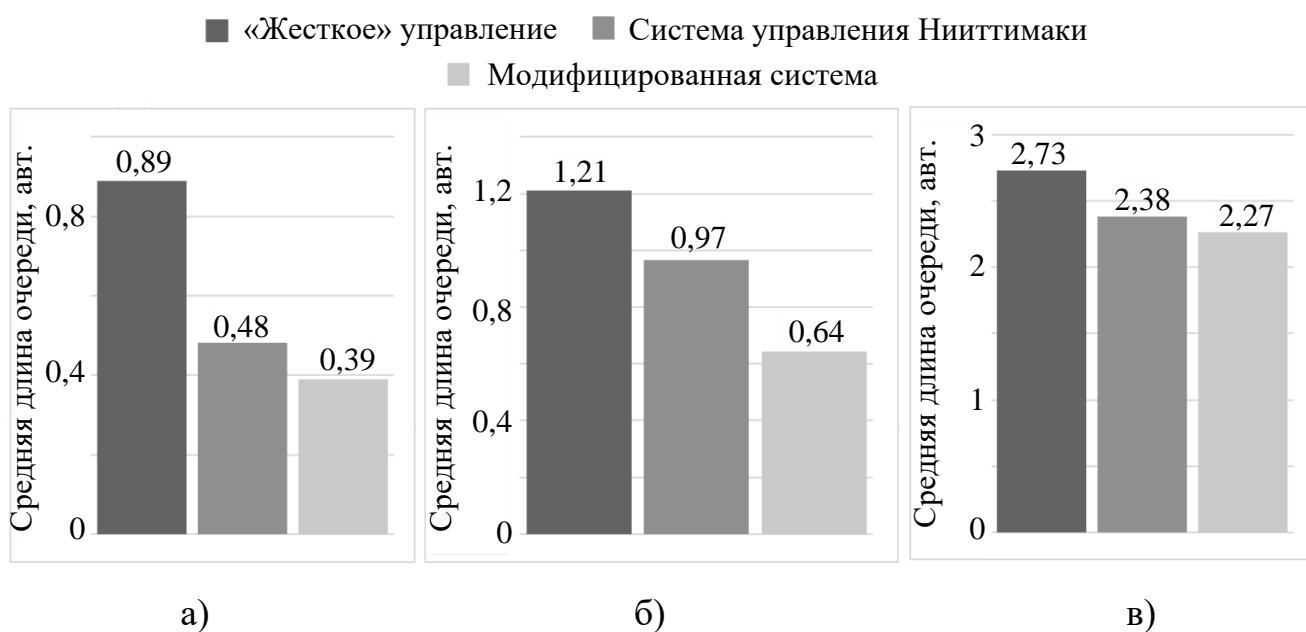
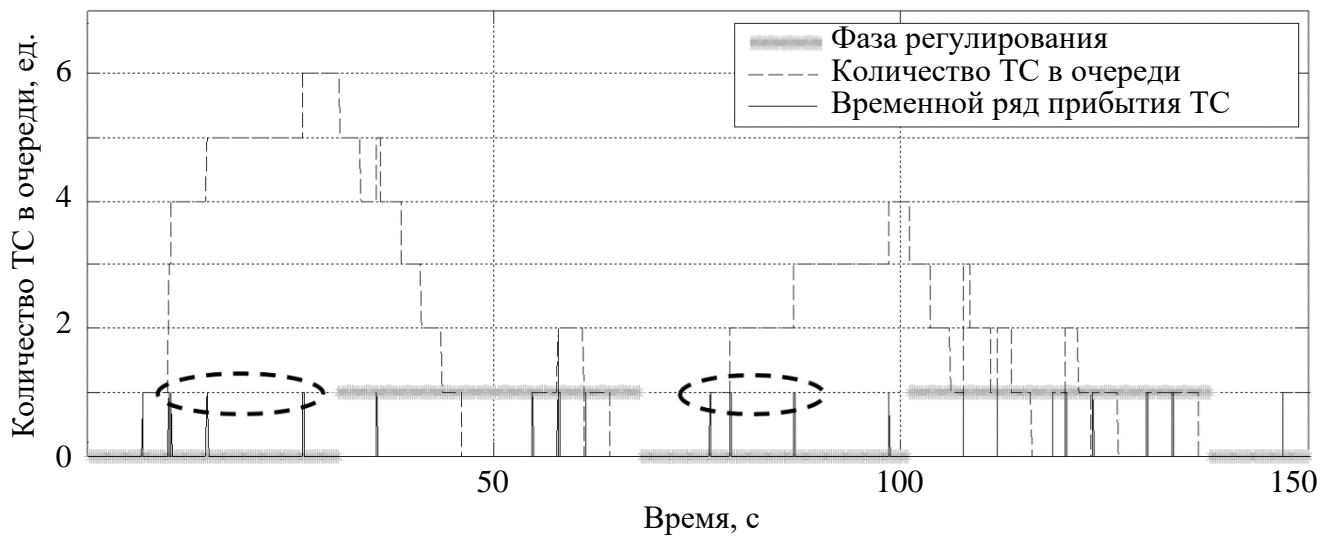


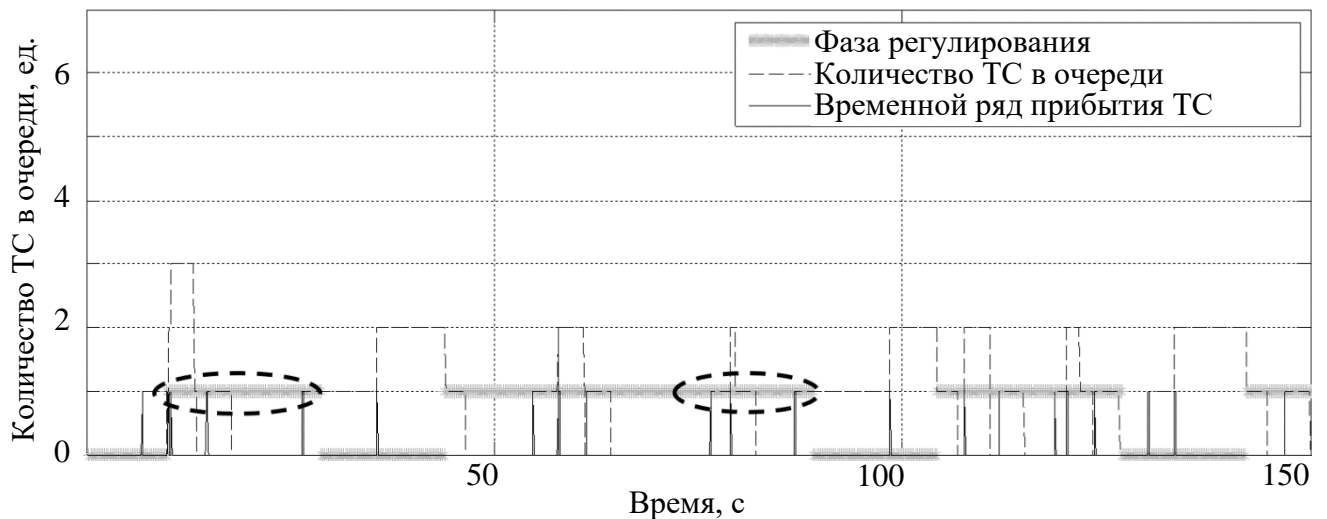
Рисунок 3.21 – Средняя длина очереди ТС на перекрестках различных типов:

а) тип 1; б) тип 2; в) тип 3.

На рисунке 3.22 жирной сплошной линией обозначено состояние разрешающей фазы регулирования в рассматриваемом направлении. Значение «1» соответствует активной разрешающей фазе, а значение «0» – неактивной (запрещающей). Тонкой сплошной линией обозначен временной ряд прибытия ТС на перекресток, а тонкой пунктирной – количество ТС в очереди. Жирной пунктирной линией обведены моменты прибытия ТС на перекресток во время запрещающей фазы при «жестком» регулировании (рисунок 3.22, а). Действие запрещающей фазы в это время привело к увеличению очереди. В то же время при использовании интеллектуальной системы управления разрешающая фаза была включена (продлена) таким образом, чтобы те же ТС проехали на зеленый сигнал светофора (рисунок 3.22, б). Такое решение позволило уменьшить длину очереди ТС при помощи «гибкого» управления.



а)



б)

Рисунок 3.22 – Диаграммы функционирования систем:

а) с «жестким» управлением; б) с интеллектуальным управлением

3.4 Разработка алгоритма прогнозирования трафика на основе нейросети

Большинство современных детекторов транспорта в условиях города имеют радиус действия 40–100 м. Расстояние между светофорными объектами в городе, как правило, составляет от 200 до 500 м. Таким образом, детекторы транспорта,

установленные на соседних перекрестках, не всегда могут отслеживать загруженность всех участков дорожной сети между перекрестками (рисунок 3.23).

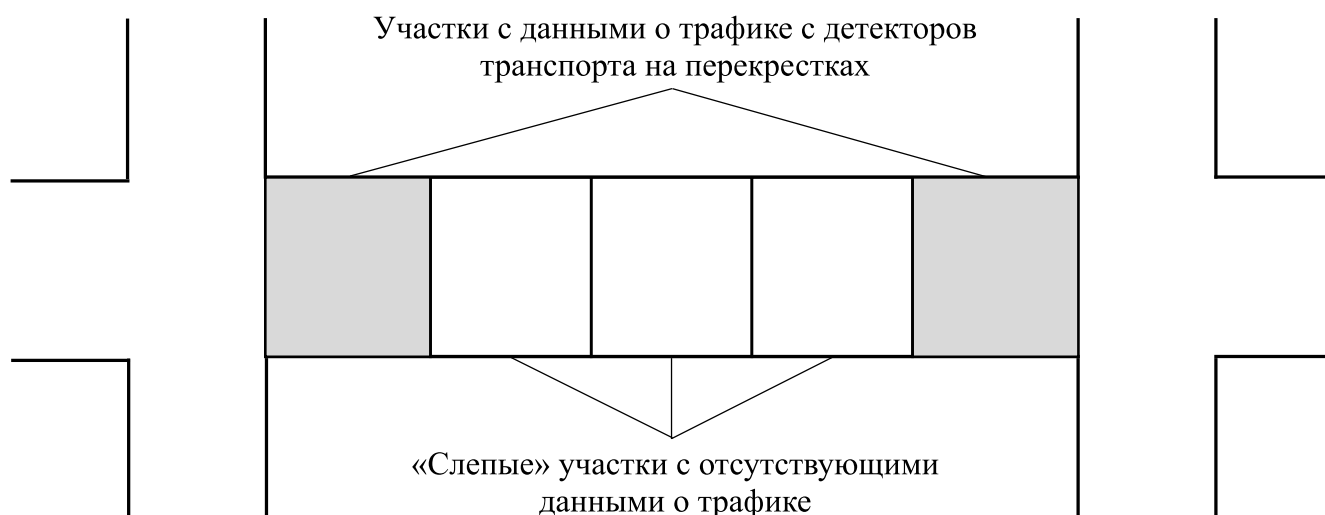


Рисунок 3.23 – Отслеживаемые и «слепые» участки проезжей части между перекрестками

Восполнение информации о трафике возможно различными способами:

1. Установка дополнительных детекторов транспорта между перекрестками. Ведет к повышению стоимости системы, расходов на установку и обслуживание, снижению надежности.

2. Использование методов прогнозирования трафика на недостижимых участках дороги на основании данных с соседних участков, собранных при помощи детекторов транспорта. Данный способ позволяет уменьшить аппаратную часть системы, однако требует большей вычислительной мощности.

Существуют различные методы прогнозирования временных рядов, включая методы экстраполяции и машинного обучения. Методы экстраполяции используют значения предыдущих периодов для прогнозирования будущих значений ряда. Они включают метод скользящего среднего, экспоненциальное сглаживание и метод Хольта-Винтерса. Метод скользящего среднего заключается в вычислении среднего значения ряда за определенный период, а затем использовании этого значения для прогнозирования будущих значений. Экспоненциальное сглаживание использует экспоненциальную функцию для прогнозирования будущих значений,

а метод Хольта-Винтерса добавляет тренд к модели экспоненциального сглаживания. Методы машинного обучения, основанные на применении нейросетей, также используют данные прошлых значений ряда в качестве входных данных для модели обучения, однако позволяют учитывать другие временные ряды, оказывающие влияние на значения прогнозируемого ряда. Нейронные сети также обычно имеют более высокую точность, чем методы экстраполяции. К недостаткам использования нейросетей для решения задач прогнозирования можно отнести необходимость обучения нейронной сети для каждого участка дороги в отдельности, что при массовом применении требует большого объема вычислительных ресурсов системы, а также наличия обучающей выборки для каждого отдельного участка. Решением проблемы может стать выделение участков улиц с типовым трафиком и использование ограниченного количества нейросетей, предварительно обученных для прогноза трафика на участке каждого типа.

3.4.1 Типизация участков дорожной сети для прогнозирования трафика

Можно выделить три основных фактора, обуславливающих характер движения транспорта на участке дорожной сети:

- 1) длина участка;
- 2) ограничение максимальной скорости движения на участке;
- 3) количество полос в одном направлении.

Так как расстояние между перекрестками в широких пределах может принимать любое значение, длина участка может быть различной и с трудом поддается типизации. Однако, принимая равными длины участков с прогнозируемым трафиком и участков, наблюдаемых детекторами транспорта, можно считать, что их длина не должна превышать радиус действия детектора транспорта. Таким образом, можно записать (3.9):

$$l_{\text{уч.}} = \frac{S}{n} \leq R_{\text{дт}}, \quad (3.9)$$

где $l_{\text{уч.}}$ – длина одного участка, м;

S – расстояние между перекрестками, м;

n – количество участков между перекрестками, шт.;

$R_{\text{дт}}$ – радиус действия детектора транспорта, м.

Приняв максимальную длину участка равной радиусу действия детектора транспорта (например, 42,7 м), рассчитаем по формуле (3.10) количество участков для диапазона расстояний между перекрестками от 200 до 500 м с шагом 1 м (рисунок 3.24).

$$n = \left\lceil \frac{S}{42,7} \right\rceil \quad (3.10)$$

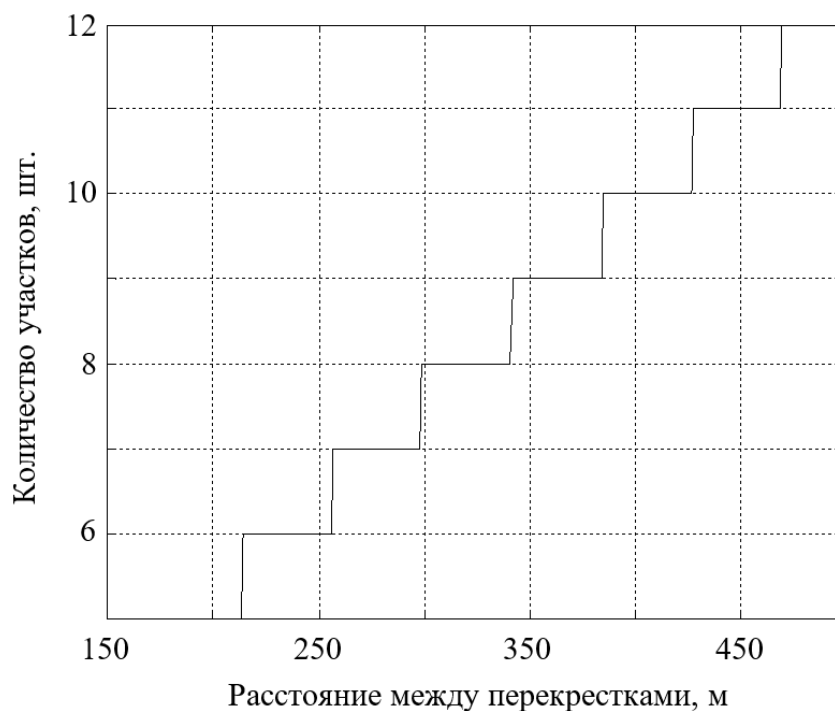


Рисунок 3.24 – Зависимость количества участков проезжей части от расстояния между перекрестками

Длина одного участка рассчитывается по формуле (3.11) для указанного диапазона расстояний между перекрестками (рисунок 3.25).

$$l_{\text{уч.}} = \frac{S}{n} \quad (3.11)$$

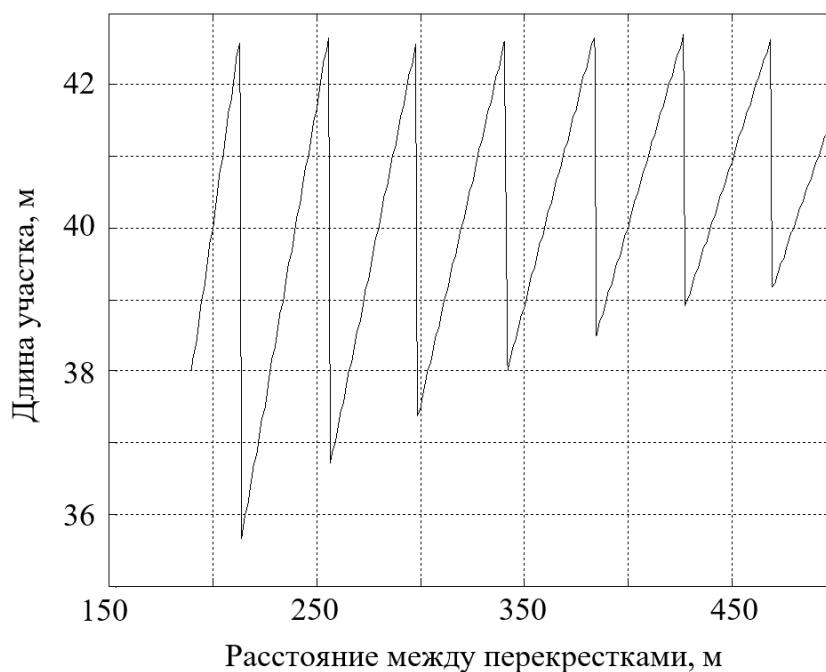


Рисунок 3.25 – Зависимость длины участка проезжей части от расстояния между перекрестками

Из рисунка 3.25 видно, что длина участка варьируется в диапазоне от 36 до 42,7 м, то есть максимальная вариация составляет 6,7 м при вариации расстояния между перекрестками от 200 до 250 м. Учитывая факт, что средняя длина легкового ТС составляет 4,2 м, а безопасная дистанция – 3 м (итого 7,2 м на одно ТС), можно сделать вывод, что максимально возможная вариация длины участка в 6,7 м способна внести погрешность в количество отслеживаемых ТС лишь на 1 единицу. Таким образом, в качестве типовой длины участка при расстоянии между перекрестками от 200 до 500 м можно выбрать усредненное значение, равное 39,6 м. Допускается пересечение участков и образование зазора между ними для достижения необходимого расстояния между перекрестками.

По ограничению максимальной скорости движения участки можно разделить на 3 наиболее распространенных типа: с ограничением в 40, 50 и 60 км/ч.

По количеству полос движения в одном направлении в условиях города также наиболее часто встречаются участки 3-х типов: 1, 2 и 3 полосы.

Таким образом, имеется 9 различных типов участков, для прогнозирования трафика на которых следует применять нейросети с различной архитектурой, обученные на различных наборах данных.

3.4.2 Определение параметров нейронной сети

Прогнозирование количества транспортных средств на «слепых» участках дорожной сети в текущий момент времени на основании прошлых известных данных о количестве автомобилей на соседних участках является задачей регрессии. Наиболее подходящими для решения задач регрессии являются нейросети прямого распространения благодаря их простоте и быстрой обучаемости при достаточно высоком качестве получаемых результатов. Прямое распространение подразумевает наличие связей между нейронами строго в направлении слева направо, то есть между слоями, и отсутствие связей между нейронами одного слоя.

Необходимо спрогнозировать текущее значение переменной $y(t)$ на основании предыдущих значений переменных $x_{11}(t) \dots x_{1i}(t), x_{21}(t) \dots x_{2i}(t)$. Выходная переменная $y(t)$ – количество ТС на одной полосе движения на участке с отсутствующими (подлежащими восстановлению) данными о трафике. Входная переменная $x_{1i}(t)$ – количество ТС на вышестоящем соседнем участке с известными данными о трафике по i -ой полосе движения. Входная переменная $x_{2i}(t)$ – количество ТС на нижестоящем соседнем участке с известными данными о трафике по i -ой полосе движения. Модель описывается формулой (3.12)

$$y(t) = f(x_{11}(t-1), \dots, x_{11}(t-d), \dots, x_{1i}(t-1), \dots, x_{1i}(t-d), \\ x_{21}(t-1), \dots, x_{21}(t-d), \dots, x_{2i}(t-1), \dots, x_{2i}(t-d)) \quad (3.12)$$

Нейросеть состоит из входного, скрытого и выходного слоев. В качестве функции активации на скрытом слое используется «гиперболический тангенс», на выходном слое – линейная функция.

Взаимосвязь входов и выходов нейронной сети представлена на рисунке 3.26.



Рисунок 3.26 – Взаимосвязь входов и выходов нейронной сети для прогнозирования трафика

При конфигурировании нейросети задается размер входного вектора задержек, определяющий, какое количество прошлых значений входных переменных должно учитываться при прогнозе выходной переменной. Также определяется количество нейронов на скрытом слое.

Период дискретности временного ряда автомобилей, проезжающих через участок дорожной сети, принимается равным 1 с. При движении ТС со скоростью 60 км/ч участок длиной 39,6 м преодолевается за 2 с, необходимый размер вектора задержки в таком случае – 3 такта. Скорость потока менее 20 км/ч для корректного прогнозирования требует размера вектора задержки не менее 7 тактов.

Количество входов нейросети определяется размером вектора задержек и количеством полос движения в одном направлении на рассматриваемом участке дороги. Так, для дороги с одной полосой движения на входы нейросети поступает

информация о количестве автомобилей на вышестоящем соседнем участке дороги в текущий момент времени t и в моменты времени $t-1 \dots t-6$, а также о количестве автомобилей на нижестоящем соседнем участке дороги в текущий момент времени t и в моменты времени $t-1 \dots t-6$. Таким образом, количество входов составляет 14. Для случая с двумя полосами движения в одном направлении информация о количестве автомобилей поступает для каждой полосы в отдельности, поэтому количество входов нейросети увеличивается вдвое, до 28. В случае с тремя и более полосами движения для крайних правых и левых полос используется нейросеть с количеством входов для двух полос движения. Для прогнозирования количества автомобилей на центральных полосах учитываются три полосы, сообщающиеся с участком прогнозирования. Количество входов в таком случае увеличивается до 42. Количество нейронов на скрытом слое принимается равным количеству входов нейросети. Характеристики нейронных сетей для участков дороги с разным количеством полос движения в одном направлении приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры нейросети, необходимые для её использования на участках различных типов

Количество полос на участке	Количество входов нейросети	Количество нейронов на скрытом слое
1	14	14
2	28	28
3	42	42

Нередкими являются ситуации, когда необходимый размер зоны обнаружения трафика превышает расстояние между перекрестками. В таких случаях прогноз трафика за границей вышестоящего перекрестка основывается на различных данных в зависимости от текущей фазы регулирования на вышестоящем перекрестке. Так, во время разрешающей фазы для движения в прямом направлении в сторону нижестоящего перекрестка трафик на участках перед вышестоящим перекрестком может быть рассчитан по формуле (3.13).

$$n_{пп} = n_{дп} \cdot \frac{q_{дп} - q_{пов}}{q_{дп}}, \quad (3.13)$$

где $n_{пп}$ – число ТС на участке, движущихся прямо от вышестоящего перекрестка;
 $n_{дп}$ – общее число ТС на участке до проезда вышестоящего перекрестка;
 $q_{дп}$ – общая интенсивность движения до проезда вышестоящего перекрестка;
 $q_{пов}$ – интенсивность движения ТС, выполняющих поворот на вышестоящем перекрестке.

Во время разрешающей фазы для движения в поворотных направлениях в сторону рассматриваемого перекрестка трафик на участках за вышестоящим перекрестком может быть рассчитан по формуле (3.14).

$$n_{п} = n_{дп} \cdot \frac{q_{лпов} + q_{ппов}}{q_{дп}}, \quad (3.14)$$

где $n_{пп}$ – количество ТС, выполняющих поворот из конфликтующих направлений на вышестоящем перекрестке;

$n_{дп}$ – общее количество ТС на участках конфликтующих направлений до проезда вышестоящего перекрестка;

$q_{лпов}$ – интенсивность движения ТС, выполняющих левый поворот из конфликтующего направления в сторону рассматриваемого перекрестка;

$q_{ппов}$ – интенсивность движения ТС, выполняющих правый поворот из конфликтующего направления в сторону рассматриваемого перекрестка;

$q_{дп}$ – общая интенсивность движения ТС в конфликтующих направлениях вышестоящего перекрестка.

Показатели интенсивности движения ТС, выполняющих поворот, широко используются при организации дорожного движения не только посредством «гибкого», но и «жесткого» управления. В настоящее время существуют и применяются решения, позволяющие получить данную статистику посредством детекторов транспорта и видеокамер с применением технологий Big Data.

3.4.3 Обучение нейронной сети

Наилучшее качество обучения нейросети может быть достигнуто при использовании обучающей выборки, полученной на реальных участках дорожной сети при помощи детекторов транспорта. Однако, ввиду того, что проведение эксперимента с использованием специального оборудования затруднительно, данные для обучения нейросети получены при помощи модели.

Обучение нейронной сети происходит по алгоритму обратного распространения ошибки, который кратко описан ниже.

1. Инициализация значений начальных весов связей случайным образом.
2. Подача данных на входной слой.
3. Вычисление вектора откликов \hat{y} нейронной сети.
4. Вычисление разницы между вектором \hat{y} и реальным значением вектора y .
5. Корректировка весов связей, приводящая к минимизации функции потерь.

Для корректировки весов используется алгоритм Левенберга-Марквардта. Одной из ключевых особенностей метода является его эффективность в условиях ограниченных данных, обеспечивая стабильную и надежную оптимизацию модели.

В качестве обучающей выборки для нейронной сети используются временные ряды с данными о количестве автомобилей на каждом из соседних участков размером 10 000 тактов при постепенно возрастающей интенсивности движения от 0,1 до 0,3 авт./с. Проверочная и контрольная выборки содержат данные о количестве автомобилей на других участках того же типа за 2500 тактов.

Качество прогнозирования оценивается по среднеквадратическому отклонению между выходными данными нейросети и целевыми значениями S (3.15), а также коэффициенту корреляции между ними R (3.16). Показатели качества прогнозирования для участков каждого типа приведены в таблице 3.4.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}; \quad (3.15)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.16)$$

где x – элементы целевой выборки;

y – элементы прогнозной выборки;

\bar{x} – среднее арифметическое, посчитанное по целевой выборке;

\bar{y} – среднее арифметическое, посчитанное по прогнозной выборке;

n – число элементов в выборке.

Таблица 3.4 – Показатели качества прогнозирования трафика на типовых участках

Ограничение скорости	Количество полос	S	R
60 км/ч	1	0,060	0,93
	2	0,083	0,91
	3	0,091	0,88
50 км/ч	1	0,059	0,93
	2	0,079	0,94
	3	0,088	0,90
40 км/ч	1	0,061	0,92
	2	0,080	0,94
	3	0,090	0,89

Визуальное представление результатов обучения нейросети для одного из типов участков приведено на рисунке 3.27.

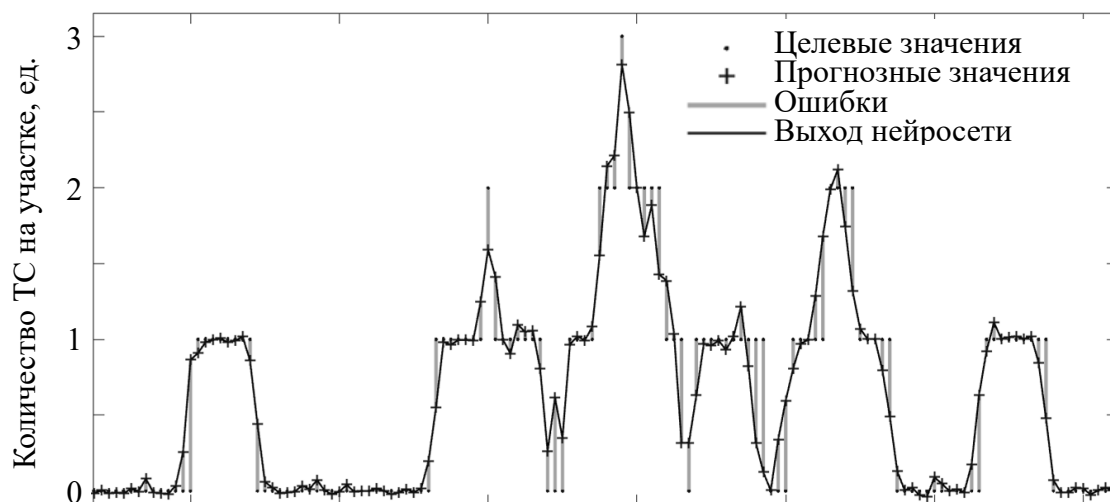


Рисунок 3.27 – График целевых и прогнозных данных нейросети

3.4.4 Оценка качества управления системы с использованием прогнозных данных о трафике

Для оценки качества управления на основе совокупности данных с детекторов транспорта и прогнозных данных, полученных при помощи нейросети, описанный ранее модельный эксперимент проведен повторно для модифицированной системы, осуществляющей управление на основе полной информации о трафике (труднореализуемой на практике) и на основе прогнозных данных нейросети. Результаты эксперимента приведены в приложении В. Использование нейросетевого прогноза позволило обеспечить необходимый объем информации о трафике для реализации предложенного метода управления при снижении качества управления не более, чем на 1,92 % по среднему времени ожидания и средней длине очереди по сравнению с идеализированной системой с полной информацией о трафике. Сравнение показателей качества системы «жесткого» управления, системы Я. Нииттимаки, модифицированной системы с полной информацией и с прогнозом приведены на рисунке 3.28.

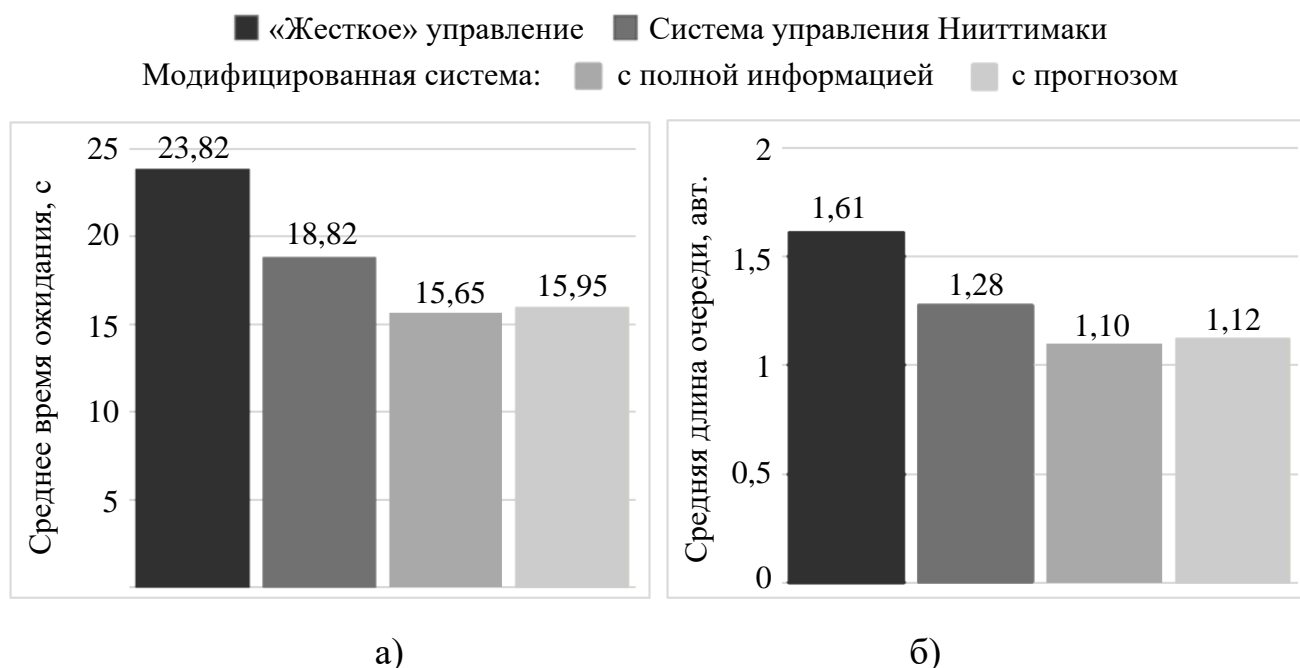


Рисунок 3.28 – Показатели качества исследуемых систем управления:

а) среднее время ожидания; б) средняя длина очереди

3.5 Разработка рекомендаций по практическому использованию предложенных решений

Система управления транспортными потоками на перекрестках может быть реализована с применением технологий «умного» города, «облачных» вычислений, беспроводной передачи данных пятого поколения. Предлагается три варианта реализации системы в зависимости от степени освоения и качества работы указанных технологий в конкретном городе.

«Облачное» управление. Данный вариант подходит для городов с обширным покрытием беспроводной связи пятого поколения, способной обеспечить бесперебойное подключение к Интернету всех объектов системы. Достоинство такой архитектуры состоит в том, что на каждом светофорном объекте достаточно установить модули ввода-вывода вместо полноценного устройства управления, что удешевит реализацию системы. Сети мобильной передачи данных в городах, как правило, характеризуются высокой надежностью, однако в случае потери светофорным объектом связи с Интернетом регулирование перекрестка становится невозможным, что следует отнести к недостаткам данной реализации системы.

Для получения информации о транспортном потоке в системе используются радиолокационные детекторы транспорта, осуществляющие передачу данных по интерфейсу RS-485. Для подключения их к контроллеру, расположенному в облаке, необходимо использовать интерфейсный модуль, работа с которым возможна по сети Ethernet. Лампы светофоров подключаются к дискретным выходам модуля вывода, который также оснащен интерфейсом Ethernet. Локальная часть системы соединяется с адаптером, который обеспечивает доступ к «облаку» посредством беспроводной передачи данных. Информация о количестве транспортных средств в зонах действия детекторов транспорта поступает на «облачные» сервера с детекторов транспорта, подключенных к сети. На основании этих данных удаленный контроллер принимает решение о переключении фаз регулирования перекрестков. Также в «облаке» формируется прогноз трафика на участках вне зоны действия детекторов транспорта. Полученные прогнозные

данные используются контроллером для расширения горизонта отслеживания трафика и повышения качества управления.

Данные из системы управления передаются в систему диспетчеризации с возможностью контроля сотрудниками посредством человеко-машинного интерфейса. Благодаря облачной архитектуре системы накапливаемая информация может быть использована сервисами навигации, службами такси и доставки для построения, оценки и корректировки маршрутов передвижения по городу.

Структурная схема комплекса технических средств системы управления при «облачной» реализации представлена на рисунке 3.29.

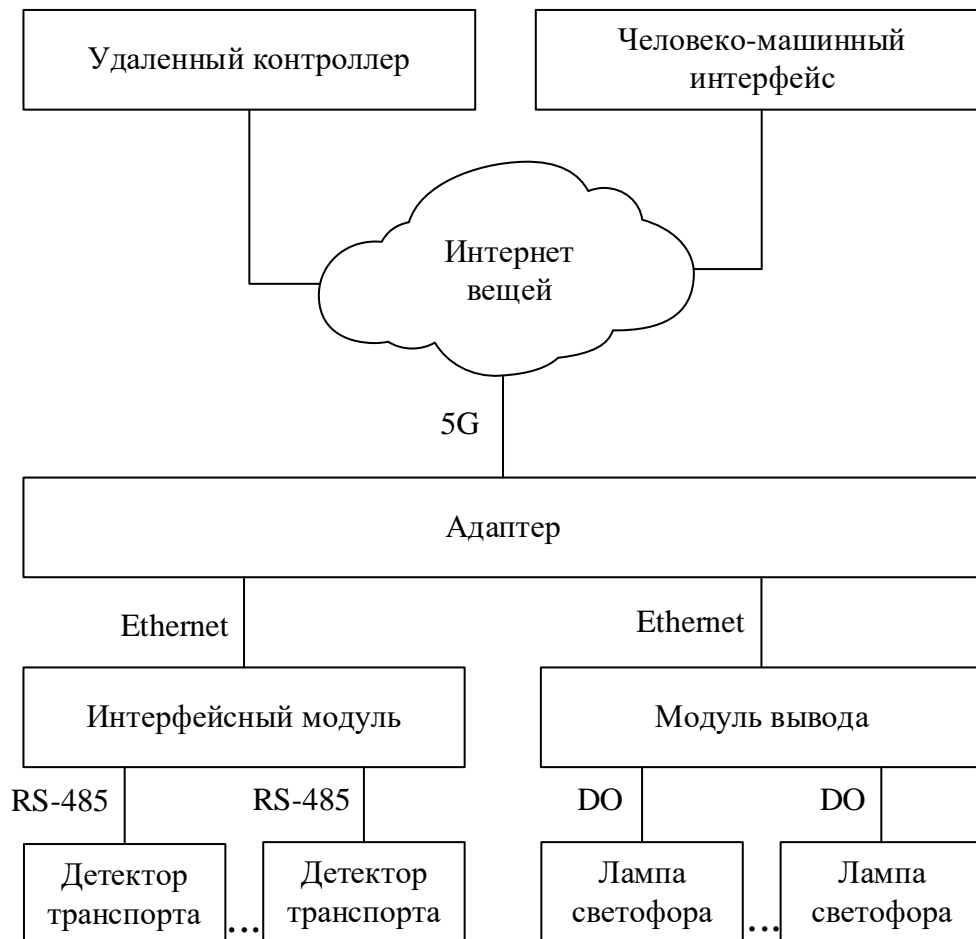


Рисунок 3.29 – Структурная схема комплекса технических средств системы управления транспортными потоками при «облачной» реализации

Локальное управление. В данном варианте реализации на каждом светофорном объекте устанавливается контроллер, к которому подключаются детекторы транспорта, расположенные на регулируемом и соседних с ним

перекрестках. Такая архитектура может использоваться при недостаточном покрытии беспроводной связи и нестабильном соединении. Опционально использование облачных технологий для подключения к системе диспетчеризации. Контроллерами, установленными на перекрестках, осуществляется как светофорное регулирование, так и прогноз трафика за пределами зоны обнаружения детекторов транспорта. Структурная схема комплекса технических средств системы при локальной реализации представлена на рисунке 3.30.

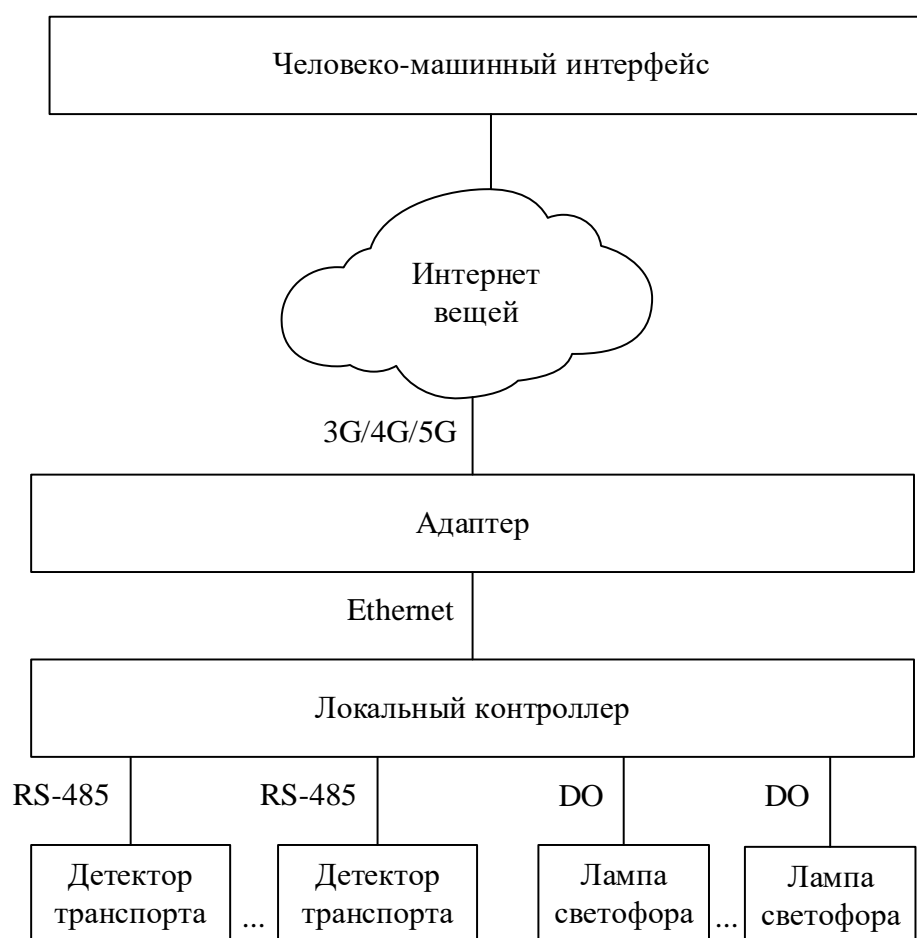


Рисунок 3.30 – Структурная схема комплекса технических средств системы управления транспортными потоками при локальной реализации

Достоинство такого подхода – в независимости управления на каждом объекте системы. Выход из строя одного из контроллеров не повлияет на работу других. Недостаток данной архитектуры – в необходимости установки устройств управления большой вычислительной мощности, что ведет к повышению затрат на

установку, обслуживание и масштабирование системы. При помощи облачных технологий при данном подходе может быть реализован человеко-машинный интерфейс для осуществления контроля и переключения режимов работы системы. Потеря связи с «облаком» не повлияет на качество светофорного регулирования.

Смешанное управление. Данный тип архитектуры предполагает установку контроллеров на каждом светофорном объекте с подключением к ним детекторов транспорта, расположенных только на регулируемом перекрестке, и связью каждого контроллера с «облаком». Система прогнозирования трафика на основе нейросети реализуется удаленно. Структурная схема комплекса технических средств системы при смешанной реализации представлена на рисунке 3.31.

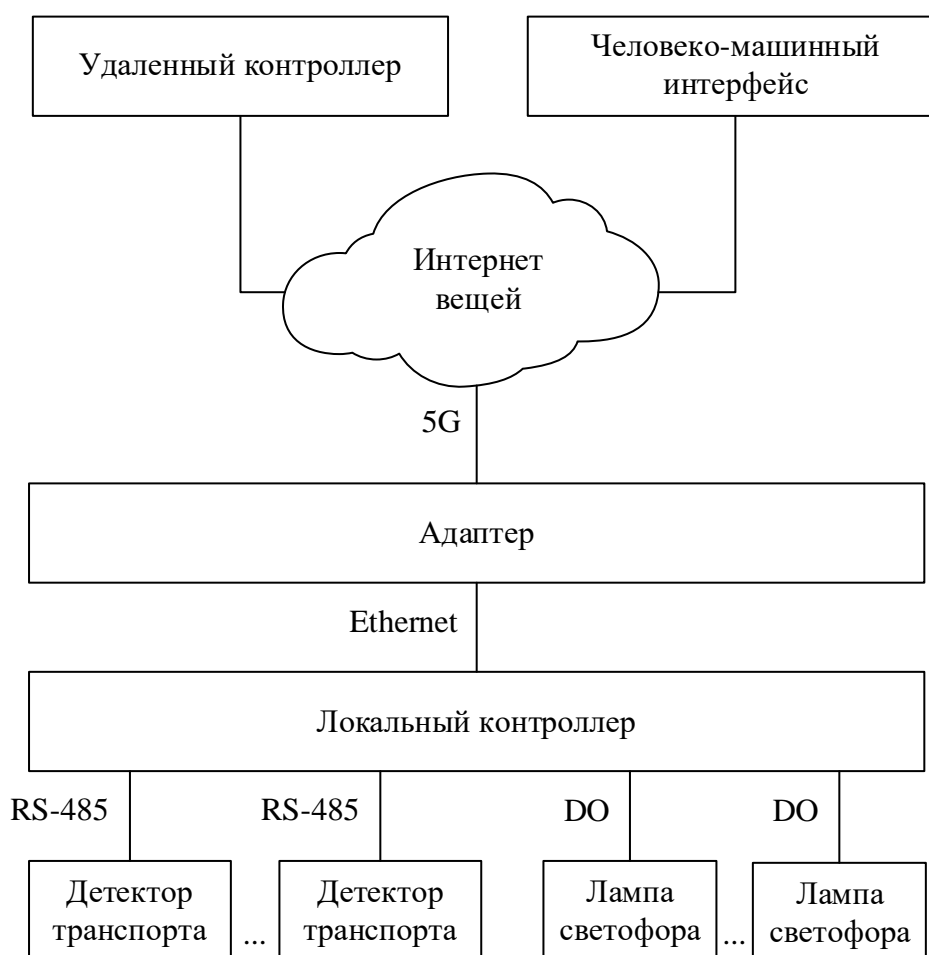


Рисунок 3.31 – Структурная схема комплекса технических средств системы управления транспортными потоками при смешанной реализации

Такой подход позволяет снизить требования к вычислительной мощности локальных устройств управления на светофорных объектах, однако в случае потери связи с «облаком» управление продолжается в условиях ограниченных данных о транспортном потоке или в «жестком» режиме.

3.6 Разработка библиотеки специализированных программных модулей на языке Structured Text

Для реализации предложенного метода управления на программируемых логических контроллерах разработана библиотека на языке Structured Text, которая содержит 7 программных модулей, соответствующих компонентам системы.

Функциональный блок `SQUARES_ON_THE_LANE` анализирует количество транспортных средств на каждом участке одной полосы движения и определяет номера ближайших к перекрестку участков, в которых появляется каждая из категорий «Мало машин» (*S*), «Средне машин» (*M*), «Много машин» (*B*). Описание функционального блока `SQUARES_ON_THE_LANE` приведено в таблице 3.5, его внешний вид представлен на рисунке 3.32.

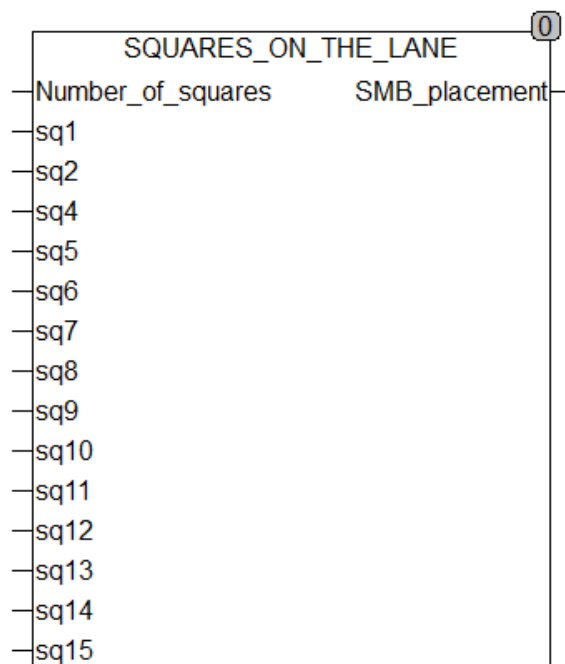


Рисунок 3.32 – Внешний вид функционального блока
`SQUARES_ON_THE_LANE`

Таблица 3.5 – Описание ФБ SQUARES_ON_THE_LANE

	Переменная	Тип	Описание
Входы	Number_of_squares	BYTE	Количество отслеживаемых участков на полосе движения.
	sq1...sq15	BYTE	Количество ТС на каждом участке.
Выходы	SMB_placement	ARRAY [1..3] OF BYTE	Номера ближайших к перекрестку участков, в которых появляется каждая из категорий количества ТС.

Функциональный блок PARALLEL_LANES определяет номер ближайшего участка с каждой из категорий количества ТС на нескольких параллельных (встречных) полосах движения. Описание данного блока приведено в таблице 3.6, его внешний вид представлен на рисунке 3.33.

Таблица 3.6 – Описание ФБ PARALLEL_LANES

	Переменная	Тип	Описание
Входы	Number_of_lanes	BYTE	Количество отслеживаемых параллельных полос движения.
	l1...l6	ARRAY [1..3] OF BYTE	Номера участков на каждой полосе движения с каждой из категорий количества ТС.
Выходы	SMB_for_all	ARRAY [1..3] OF BYTE	Номера ближайших к перекрестку участков с каждой из категорий количества ТС для всех рассматриваемых полос.

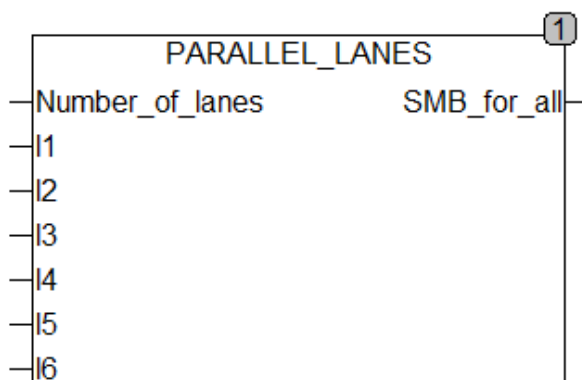


Рисунок 3.33 – Внешний вид функционального блока
PARALLEL_LANES

Функциональный блок FUZZY_CONTROL реализует нечеткое управление перекрестком. Треугольные функции принадлежности каждого терма описываются тремя переменными, значения которых соответствуют точкам излома функции. Если значение входной переменной системы находится в диапазоне между первой и второй точками излома функции, степень его принадлежности данной функции осуществляется по формуле (3.17).

$$A = \frac{S - P_1}{P_2 - P_1}, \quad (3.17)$$

где A – степень принадлежности значения к нечеткому множеству;

S – входная переменная системы;

P_1, P_2 – точки излома функции принадлежности.

Если значение входной переменной системы находится в диапазоне между второй и третьей точками излома функции, степень её принадлежности данной функции осуществляется по формуле (3.18). В противном случае степень её принадлежности рассматриваемому нечеткому множеству равна нулю.

$$A = 1 - \frac{S - P_2}{P_3 - P_2} \quad (3.18)$$

Для реализации дефаззификации используется метод центра масс для синглтонов – числовых пар, состоящих из элемента множества и степени принадлежности этого элемента множеству. Значение дефаззифицированного сигнала определяется по формуле (3.19).

$$u = \frac{\sum_i a_i s_i}{\sum_i a_i}, \quad (3.19)$$

где a_i – степень соответствия для i -го правила;

s_i – значение синглтона в выводе i -го правила.

Исходя из значения дефаззифицированной переменной принимается решение об активации той или иной фазы согласно принципу работы системы.

Описание функционального блока FUZZY_CONTROL приведено в таблице 3.7, его внешний вид представлен на рисунке 3.34.

Таблица 3.7 – Описание ФБ FUZZY_CONTROL

	Переменная	Тип	Описание
Входы	NS	ARRAY [1..3] OF BYTE	Номера ближайших к перекрестку участков с каждой из категорий количества ТС в условном направлении север-юг (юг-север).
	EW	ARRAY [1..3] OF BYTE	Номера ближайших к перекрестку участков с каждой из категорий количества ТС в условном направлении восток-запад (запад-восток).
Выходы	NS_permission	BOOL	Сигнал управления разрешающей фазой регулирования в условном направлении север-юг (юг-север).
	EW_permission	BOOL	Сигнал управления разрешающей фазой регулирования в условном направлении восток-запад (запад-восток).

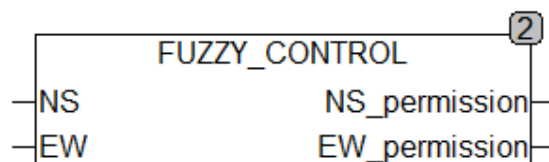


Рисунок 3.34 – Внешний вид функционального блока FUZZY_CONTROL

Функциональный блок LIGHTS_BASIC реализует переключение группы из трёх сигналов светофора на основе текущей фазы регулирования. При активации фазы регулирования, сигнал о которой подается на вход Permission блока LIGHTS_BASIC, запускается таймер работы желтого сигнала, затем зеленого. После окончания фазы активируется комбинация желтого и красного сигналов. Описание блока приведено в таблице 3.8, его внешний вид — на рисунке 3.35.

Таблица 3.8 – Описание ФБ LIGHTS_BASIC

	Переменная	Тип	Описание
Входы	Permission	BOOL	Состояние разрешающей фазы регулирования в заданном направлении.
Выходы	Red	BOOL	Сигнал управления красным светом.
	Yellow	BOOL	Сигнал управления желтым светом.
	Green	BOOL	Сигнал управления зеленым светом.

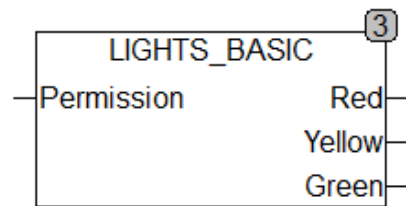


Рисунок 3.35 – Внешний вид функционального блока
LIGHTS_BASIC

Функциональный блок LIGHTS_RIGHT реализует переключение группы из четырёх сигналов светофора с секцией зеленого света для поворота направо на основе текущей фазы регулирования. Функционал данного блока аналогичен функционалу блока LIGHTS_BASIC с добавлением зеленого сигнала для поворота направо. Описание блока LIGHTS_RIGHT приведено в таблице 3.9, его внешний вид — на рисунке 3.36.

Таблица 3.9 – Описание ФБ LIGHTS_RIGHT

	Переменная	Тип	Описание
Входы	Permission	BOOL	Состояние разрешающей фазы регулирования в заданном направлении.
Выходы	Red	BOOL	Сигнал управления красным светом.
	Yellow	BOOL	Сигнал управления желтым светом.
	Green	BOOL	Сигнал управления зеленым светом.
	Green_right	BOOL	Сигнал управления зеленым светом для поворота направо.

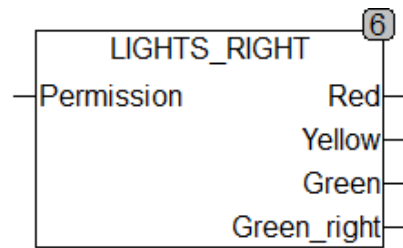


Рисунок 3.36 – Внешний вид
функционального блока LIGHTS_RIGHT

Функциональный блок LIGHTS_LEFT_SINGLE_LANE реализует переключение группы из четырёх сигналов светофора с секцией зеленого света для поворота налево на дорогах с одной полосой движения в одном направлении. В данном блоке реализована подсистема нечеткого управления третьей фазой регулирования. На входы блока NS_count и SN_count поступают данные о количестве ТС в прямом и конфликтующем направлениях, на основании которых с использованием нечетких правил принимается решение о включении третьей фазы регулирования. Описание данного блока приведено в таблице 3.10, его внешний вид — на рисунке 3.37.

Таблица 3.10 – Описание ФБ LIGHTS_LEFT_SINGLE_LANE

	Переменная	Тип	Описание
Входы	Permission	BOOL	Состояние разрешающей фазы регулирования в заданном направлении.
	NS_count	BYTE	Количество ТС, движущихся в условном направлении север-юг.
	SN_count	BYTE	Количество ТС, движущихся в условном направлении юг-север.
Выходы	Red	BOOL	Сигнал управления красным светом.
	Yellow	BOOL	Сигнал управления желтым светом.
	Green	BOOL	Сигнал управления зеленым светом.
	Green_right	BOOL	Сигнал управления зеленым светом для поворота налево.

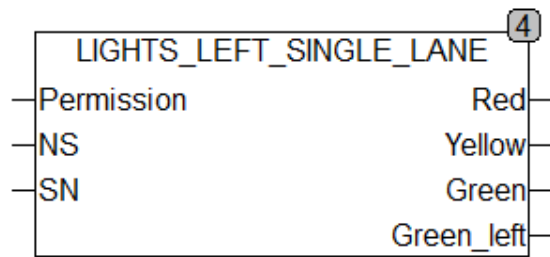


Рисунок 3.37 – Внешний вид функционального блока
LIGHTS_LEFT_SINGLE_LANE

Функциональный блок LIGHTS_LEFT_MULTI_LANES реализует переключение группы из четырёх сигналов светофора с секцией зеленого света для поворота налево на дорогах с двумя и более полосами движения в одном направлении. В данном блоке также реализована подсистема нечеткого управления третьей фазой регулирования. На входы блока Left_lanes_count и Other_lanes_count поступают данные о количестве ТС на левых и на остальных полосах движения, на основании которых с использованием нечетких правил принимается решение о включении третьей фазы регулирования. Описание данного блока приведено в таблице 3.11, его внешний вид — на рисунке 3.38.

Таблица 3.11 – Описание ФБ LIGHTS_LEFT_MULTI_LANES

	Переменная	Тип	Описание
Входы	Permission	BOOL	Состояние разрешающей фазы регулирования в заданном направлении.
	Left_lanes_count	BYTE	Количество ТС, движущихся по левой полосе наиболее загруженного направления.
	Other_lanes_count	BYTE	Количество ТС, движущихся по наиболее загруженной правой (средней) полосе обоих направлений.
Выходы	Red	BOOL	Сигнал управления красным светом.
	Yellow	BOOL	Сигнал управления желтым светом.
	Green	BOOL	Сигнал управления зеленым светом.
	Green_right	BOOL	Сигнал управления зеленым светом для поворота налево.

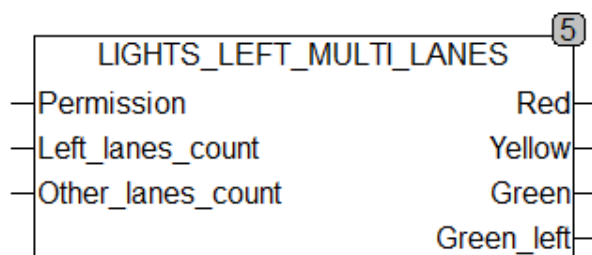


Рисунок 3.38 – Внешний вид функционального блока
LIGHTS_LEFT_MULTI_LANES

3.7 Выводы по разделу 3

1. Разработана структурная схема интеллектуальной системы управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием. На вход системы поступает информация о количестве транспортных средств на участках проезжей части, длина которых выбрана по определенным критериям учета транспорта. Управляющим воздействием в системе выступают сигналы переключения фаз регулирования. В качестве возмущающих воздействий приняты значения интенсивности движения ТС за пределами зоны отслеживания трафика, а также режим регулирования соседних светофорных объектов.

2. Предложена модификация интеллектуальной системы управления транспортными потоками на перекрёстке, основанная на нечеткой логике, которая обеспечивает формирование вектора управляющих воздействий на основе оценки целесообразности смены фазы регулирования, делая систему более чувствительной к микроколебаниям интенсивности транспортного потока по сравнению с известными системами интеллектуального управления. Принцип работы системы приближен к действиям регулировщика, при этом значительно увеличен объем информации о состоянии транспортных потоков на подъездах к перекрестку. Данная система управления может включать в себя подсистему управления включением фазы для выполнения левого поворота на дорогах с одной полосой движения в одном направлении, а также двумя и более полосами движения в одном направлении в зависимости от конфигурации перекрестка.

3. Проведено модельное исследование и сравнение качества управления трех систем: с «жестким» управлением, с интеллектуальным управлением на основе нечеткой логики, предложенной Я. Нииттимаки, и модифицированной системы с интеллектуальным управлением на основе нечеткой логики. Результаты моделирования показали повышение качества управления при использовании модифицированной системы в среднем на 39 % по сравнению с «жестким» управлением и на 13 % по сравнению с системой Я. Нииттимаки.

4. Рассмотрены методы прогнозирования транспортных потоков на тех участках дорожной сети, где затруднено получение информации о дорожном движении при помощи средств обнаружения трафика. Методы, основанные на применении нейросетей, более эффективны, чем методы экстраполяции, так как позволяют учитывать различные факторы при прогнозе и показывают более высокую точность, однако требуют больших объемов вычислительных ресурсов. Разработан алгоритм нейросетевого прогнозирования трафика на участках дорожной сети. Для экономии ресурсов предлагается выделить 9 наиболее распространенных типов участков и использовать на участке каждого типа нейросети с различными параметрами, обученные на соответствующей выборке. Проведено моделирование и сравнение качества работы модифицированной системы управления, имеющей полную информацию о транспортном потоке (однако труднореализуемой на практике) и получающей информацию на основе нейросетевого прогнозирования. По результатам моделирования использование нейросетевого прогнозирования привело к снижению качества управления не более, чем на 1,92 % по среднему времени ожидания и средней длине очереди по сравнению с идеализированной системой.

5. Разработаны 3 варианта структурной схемы комплекса технических средств интеллектуальной системы управления с использованием технологий Интернета вещей и «облачных» вычислений в зависимости от степени освоения данных технологий в конкретном городе. Первый вариант реализации предполагает полностью «облачное» управление с размещением на объектах модулей ввода-вывода. Второй вариант допускает установку устройств управления

непосредственно на каждом объекте и использование «облака» только для реализации функций диспетчеризации. Третий вариант совмещает в себе локальное управление на каждом перекрестке в отдельности и систему прогнозирования транспортных потоков, реализованную «в облаке».

6. Разработана библиотека специализированных программных модулей на языке Structured Text. Она состоит из 7 блоков, позволяющих реализовать основные функции интеллектуальной системы управления транспортными потоками на программируемом логическом контроллере.

Рассматриваемые в разделе вопросы опубликованы в научных работах соискателя [99, 100, 101].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научная задача совершенствования системы управления автотранспортными потоками путем научного обоснования структуры и параметров применяемых математических моделей описания трафика и модификации метода интеллектуального управления с использованием принципов нечеткой логики и нейросетевого прогнозирования для повышения эффективности управления потоками автотранспортных средств при проезде регулируемых перекрестков.

По результатам работы сформулированы следующие выводы.

1. Проведенный анализ существующих систем «гибкого» управления транспортными потоками показал, что их алгоритмы основаны на приращении длительности фаз регулирования различными методами. Однако, такие системы управления зачастую нечувствительны к микроколебаниям транспортного потока и обеспечивают недостаточно высокое качество управления. Существующие системы управления основаны на использовании детекторов транспорта устаревшего типа, в то время как современные средства обнаружения трафика обеспечивают больший объем информации о транспортном потоке. Современные технологии беспроводной передачи данных и «облачных» вычислений позволяют упростить реализацию распределенных систем управления такими объектами и оптимизировать использование вычислительных ресурсов.

2. Выявлено, что в известных математических моделях задержки транспортных средств на перекрестках М. Дж. Бэкманна и Ф. В. Вебстера интенсивность прибытия автомобилей на перекресток принимается постоянной в течение цикла регулирования, что приводит к неадекватности модельных и экспериментальных данных в ряде режимов, в частности, при сильно неравномерном трафике.

3. Осуществлена модификация модели М. Дж. Бэкманна путем введения в неё выражения, учитывающего сдвиг режима регулирования на соседних

светофорных объектах и неравномерность автотранспортного потока, что позволяет применять модель М. Дж. Бэкманна в условиях перекрестков с высокой степенью взаимосвязи по транспортному потоку и повысить адекватность модели, подтверждаемую расхождением модельных и экспериментальных данных в пределах 5 %, в том числе для условий сильной неравномерности транспортных потоков с соседних перекрестков.

4. Проведена модификация системы интеллектуального управления автотранспортными потоками на регулируемых перекрёстках, основанная на нечеткой логике, которая обеспечивает формирование вектора управляющих воздействий на основе оценки целесообразности смены фазы регулирования, делая систему более чувствительной к микроколебаниям транспортного потока по сравнению с известными системами интеллектуального управления. Принцип работы системы приближен к действиям эксперта-регулирующего, при этом значительно увеличен объем информации о состоянии транспортных потоков на подъездах к перекрестку. Предложенные решения позволяют повысить качество управления в среднем на 39 % по сравнению с «жестким» управлением и в среднем на 13 % по сравнению с известными системами интеллектуального управления.

5. Разработан алгоритм нейросетевого прогнозирования параметров автотранспортных потоков на участках дорожной сети, где затруднено получение информации о параметрах трафика при помощи детекторов транспорта, на основе данных о транспортном потоке на соседних участках. Алгоритм позволяет обеспечить необходимый объем информации о трафике для реализации предложенного метода управления при снижении качества управления не более, чем на 1,92 % по сравнению с идеализированной системой.

6. Разработанные рекомендации по практической реализации представленных решений предлагают 3 варианта структуры комплекса технических средств интеллектуальной системы управления и позволяют адаптировать использование системы к условиям конкретного города в зависимости от степени освоения технологий Интернета вещей и «облачных» вычислений. Разработанная библиотека специализированных программных

модулей на языке Structured Text позволяет реализовать основные функции интеллектуальной системы управления транспортными потоками на программируемом логическом контроллере.

7. Разработанные решения получили применение в Администрации городского округа Донецк Донецкой Народной Республики, внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «ДонНТУ», являются частью исследований, проведённых в рамках госбюджетной темы ГТ № Н 2024-2 «Метод интеллектуального управления для регулирования транспортных потоков» ФГБОУ ВО «ДонНТУ».

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в следующем:

- разработка методики кластеризации дорожной сети города для наиболее эффективного применения интеллектуального управления в отдельных районах;
- разработка механизма информирования участников дорожного движения о длительности фаз регулирования при интеллектуальном управлении автотрафиком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логиновский, О. В. Развитие подходов к управлению и организации движения транспорта в крупных городах / О. В. Логиновский, А. А. Шинкарев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 51-58.
2. Тематический обзор Ассоциации: системы адаптивного управления дорожным движением и дорожные контроллеры. Вып. № 2/2017. – СПб.: Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2017. – 48 с.
3. Кременец, Ю. А. Технические средства организации дорожного движения / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев. – М. : Академкнига, 2005. – 279 с.
4. Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Организация дорожного движения на регулируемых пересечениях. – М. : Минтранс РФ, 2017. – 91 с.
5. Рутковский, В. Н. Анализ, разработка и реализация адаптивных алгоритмов (гибкого) светофорного регулирования / В. Н. Рутковский, Д. В. Капский // Системный анализ и прикладная информатика. – 2023. – № 3. – С. 4–6.
6. Джетенова, С. Н. Анализ методов управления движением транспортных потоков / С. Н. Джетенова // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2014. – Т. 14, № 12. – С. 153–155.
7. Абрамова, Л. С. Постановка задачи оптимизации адаптивного управления дорожным движением / Л. С. Абрамова, Н. С. Чернобаев // Вісник ДІАТ. – 2009. – №1. – С. 7–12.
8. Басков, В. Н. К вопросу о регулировании транспортного потока с оптимизацией задержек на улично-дорожной сети / В. Н. Басков, А. В. Игнатов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ : материалы

международной научно-практической конференции. – Саратов: СГТУ им. Ю. А. Гагарина, 2014. – С. 108–110.

9. Белов, Ю. В. Интеллектуальные средства и технологии инфраструктуры городского дорожного движения / Ю. В. Белов, А. Н. Полетайкин // Автомобильный транспорт. – 2014. – №. 35. – С. 13–21.

10. Боровской, А. Е. Методика выбора рационального режима работы светофорного объекта на автомобильном транспорте / А. Е. Боровской, А. Г. Шевцова // Трансп.: Наука, техн., упр. – 2012. – № 6. – С. 50–53.

11. Евдокимов, А. О. Имитационная модель перекрестка с системой интеллектуального управления / А. О. Евдокимов, А. В. Горохов, Д. Я. Лугов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 5 (36). – с. 55–59.

12. Жамангарин, Д. С. Интеллектуальный метод динамического управления светофорами нескольких контроллеров / Д. С. Жамангарин, Н. К. Смайлов // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: Материалы XVI Международной научно-практической конференции. – Сочи, 2019. – С. 43–47.

13. Капский, Д. В. Анализ алгоритмов управления дорожным движением и их применимости на современном этапе развития ИИТС / Д. В. Капский, И. Н. Пугачев, Д. В. Навой // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – 2019. – № 1–1. – С. 259–264.

14. Кашталинский, А. С. Учет внутрисетевой неравномерности транспортных потоков на регулируемых пересечениях / А. С. Кашталинский // Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса: материалы V междунар. заочной науч.-практ. конф. – Новокузнецк : КГТУ им. Т. Ф. Горбачева, 2016. – С. 38–43.

15. Кретов, А. Ю. Обзор некоторых адаптивных алгоритмов светофорного регулирования перекрестков / А. Ю. Кретов, И. Е. Агуреев, И. Ю. Мацур // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып. 7. Ч. 2. – С. 61–66.

16. Пенаев, Г. М. Адаптивные системы управления объектами транспортной инфраструктуры / Г. М. Пенаев, Р. Б. Хыдыров, С. О. Мередов, Ш. А. Шыхыев // Экономика. Право. Инновации. – 2022. – № 4. – С. 58–65.

17. Энгель, Е. А. Интеллектуальные системы автоматического управления сетью светофоров / Е. А. Энгель, Н. Е. Энгель // Вестник Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова. – 2018. – № 23. – С. 30–32.

18. Chakraborty, A. D. A. Intelligent Traffic Control System: Towards Smart City / A. D. A. Chakraborty, A. Kumar, A. Roy, S. Roy, D. Chakraborty, H. N. Saha // IEEE 10th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON). – 2019. – P. 1124–1129.

19. Gündoğan, F. An Evaluation of Adaptive Traffic Control System in Istanbul, Turkey / F. Gündoğan, Z. Karagoz, N. Kocyigit, A. Karadag, H. Ceylan, Y. Ş. Murat // Traffic Logistics Eng. – 2014. – Vol. 2, No. 3. – P. 1–4.

20. Hardy, J. Smart City: A Traffic Signal Control System for Reducing the Effects of Traffic Congestion in Urban Environments / J. Hardy. – Derby : University of Derby, 2019. – 263 p.

21. Mansurova, M. E. Interaction of Adjacent Smart Traffic Lights During Traffic Jams at an Intersection / M. E. Mansurova, B. A. Belgibaev, S. Sh. Ixanov, D. T. Karimsakova, D. S. Zhamangarin // Applied Mathematics and Information Sciences. – 2021. – V. 15, No. 3. – P. 67–80.

22. Muthanna, M. S. A. Smart System of a Real-Time Pedestrian Detection for Smart City / M. S. Muthanna, Y. T. Lyachek, A. M. O. Musaeed, Y. A. H. Esmail, A. B. M. Adam // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. – 2020. – P. 45–50.

23. Shaikh, P. W. A Review on Swarm Intelligence and Evolutionary Algorithms for Solving the Traffic Signal Control Problem / P. W. Shaikh, M. El-Abd, M. Khanafer, K. Gao // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (TITS). – 2020. – Vol. 23, No. 1. – P. 48–63.

24. Панькина, К. Е. Сравнительный анализ адаптивных систем управления дорожным движением / К. Е. Панькина // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года. – Москва : Российский университет транспорта, 2022. – С. 263–271.

25. Горошко, В. С. Обзор характеристик адаптивных систем управления дорожным движением / В. С. Горошко, Я. И. Шамлицкий // Логистические системы в глобальной экономике. – 2013. – № 3-2. – С. 34–38.

26. Busch, F. MOTION for SITRAFFIC / F. Busch, G. Kruse // International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. – Oakland, California, 2001. – P. 61–64.

27. Власов, А. А. Управление насыщенными транспортными потоками в городах : монография / А. А. Власов, Н. А. Орлов. – Пенза : ПГУАС, 2014. – 188 с.

28. Gartner, N. H. Implementation of the OPAC adaptive control strategy in a traffic signal network / N. H. Gartner, F. J. Pooran, C. M. Andrews // Proc. 4th IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems. – 2001. – P. 197–202.

29. Gartner, N. H. Implementation and Field Testing of the OPAC Adaptive Control Strategy in RT-TRACS / N. H. Gartner, F. J. Pooran, C. M. Andrews // Journal of the Transportation Research Board. – Washington, D.C., 2002. – P. 148–156.

30. Lowrie, P. R. The Sydney Coordinated Adaptive Traffic System – Principles, Methodology, Algorithms / P. R. Lowrie // Proceedings of International Conference on Road Traffic Signaling. – Institution of Electrical Engineers. – London, 1982. – P. 67–70.

31. Luk, J. Y. K. SCATS – Application and Field Comparison with a TRANSYT Optimised Fixed Time System / J. Y. K. Luk, A. G. Sims, P. R. Lowrie // Proceedings of International Conference on Road Traffic Signaling. – London : Institution of Electrical Engineers, 1982. – P. 71–74.

32. Hunt, P. B. SCOOT – a Traffic Responsive Method of Coordinating Signals / P. B. Hunt, D. I. Robertson, R. D. Bretherton, R. I. Winton // Transport and Road Research Lab. – Crowthorne, Berkshire, U.K, 1981. – P 56–68.

33. Powell, R. J. SCOOT in Southampton / R. J. Powell // Proceedings for the PTRC Annual Summer Meeting at Seminar M, 1985. – P. 97–110.

34. Bretherton, R. D., SCOOT Version 4 / R. D. Betherton, K. Wood, G. T. Bowen // Traffic Engineering and Control. – 1998. – Vol. 39, No. 7. – P. 425–427.

35. Казарян, Д. Э. Нейросетевые подходы к управлению потоками транспорта / Д. Э. Казарян, В. А. Михалев, Е. А. Софронова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2017. – Т. 18, № 1. – С. 97–106.

36. Прогнозирование транспортных потоков агломераций на основе нейронной сети / Н. Г. Куфтинова, А. В. Остроух, Н. Е. Суркова, К. А. Баринов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2020. – № 11. – С. 40–45.

37. Lingani, G. M. Smart Traffic Management System Using Deep Learning for Smart City Applications / G. M. Lingani, D. B. Rawat, M. Garuba // IEEE 9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference. – 2019. – P. 101–106.

38. Mondal, M. A. Intelligent Traffic Congestion Classification System Using Artificial Neural Network / M. A. Mondal, Z. Rehena // Companion Proceedings of the World Wide Web conference. – 2019. – P. 110–116.

39. Нейросетевая технология анализа транспортных потоков в автоматизированных системах управления дорожным движением / Р. М. Хусаинов, Н. Г. Талипов, А. С. Катасев, Д. В. Шалаева // Программная инженерия. – 2023. – Т. 14, № 10. – С. 513–519.

40. Григорьев, Д. А. Инструментальные средства для нейросетевого моделирования и управления транспортными потоками на перекрестках : специальность 05.13.11 «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Григорьев Денис Алексеевич. – Уфа, 2004. – 16 с.

41. Хамидулин, Т. Г. Оптимизация управления городскими светофорами с применением нейронных сетей / Т. Г. Хамидулин // Экономика и социум. – 2017. – № 5-2 (36). – С. 614–617.

42. Лукомская, О. Ю. Когнитивные нейросетевые технологии в задачах управления транспортной системой / О. Ю. Лукомская // Технологии построения когнитивных транспортных систем: Материалы всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 30–31 мая 2018 года. – Санкт-

Петербург: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2018. – С. 141–147.

43. Зацерковный, А. В. Нейросетевой анализ транспортных потоков городских агломераций на основе данных публичных камер видеонаблюдения / А. В. Зацерковный, Е. А. Нурминский // Компьютерные исследования и моделирование. – 2021. – Т. 13, № 2. – С. 305–318.

44. Сапрыкин, О. Н. Пространственно-временной нейросетевой анализ интенсивности транспортных потоков / О. Н. Сапрыкин // ИТ & транспорт: Сборник научных статей. Том 3. – Самара: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственный центр «Интеллектуальные транспортные системы», 2015. – С. 112–120.

45. Бобырь, М. В. Система управления интеллектуальным светофором на основе нечеткой логики / М. В. Бобырь, Н. И. Храпова, М. А. Ламонов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2021. – Т. 25, № 4. – С. 162–176.

46. Тарасов, О. В. Оптимизация режимов работы объектов светофорного регулирования методами нечеткой логики / О. В. Тарасов, С. Н. Корнилов // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2012. – Т. 2, № 1. – С. 139–143.

47. Ali, M. E. M. An Adaptive Method for Traffic Signal Control Based on Fuzzy Logic with Webster and Modified Webster Formula Using SUMO Traffic Simulator / M. E. M. Ali, A. Durdu, S. A. Celtek, A. Yilmaz // IEEE Access. – 2021. – P. 1138–1145.

48. Azarshab, M. An Intelligent Fuzzy Logic Based Traffic Controller / M. Azarshab, M. Ghazanfari, F. Heidarpour // SRPH Journal of Fundamental Sciences and Technology. – 2021. – No. 3 (1). – P. 10–17.

49. Iyer, V. Intelligent Traffic Signal Synchronization Using Fuzzy Logic and Q-Learning / V. Iyer, R. Jadhav, U. Mavchi, J. Abraham, // Proceedings of the 2016 International Conference on Computing, Analytics and Security Trends (CAST). – Pune, India, 2016. – P. 156–161.

50. Koukol, M. Fuzzy Logic in Traffic Engineering: A Review on Signal Control / M. Koukol, L. Zajickova, L. Marek, P. Tucek // Advanced Transportation Mathematical Modeling and Simulation. – 2015. – P. 97–110.

51. Mahmood, T. A Two-Stage Fuzzy Logic Adaptive Traffic Signal Control for an Isolated Intersection Based on Real Data Using SUMO Simulator / T. Mahmood, M. E. M. Ali, A. Durdu // Electron. Commun. Eng. – 2019. – Vol. 3, P. 656–659.

52. Pappis, C. A Fuzzy Logic Controller for a Traffic Junction / C. Pappis, E. Mamdani // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1977. – No. 10. – P. 707–717.

53. Soh, A. C. MATLAB Simulation of Fuzzy Traffic Controller for Multilane Isolated Intersection / A. C. Soh, L. G. Rhung, H. M. Sarkan // Int. J. Comput. Sci. Eng. – 2010. – Vol. 2, No. 4. – P. 924–933.

54. Van, N. H. A Fuzzy Traffic Signal Control Method for a Single Intersection Under Mixed Traffic Conditions / N. H. Van, V. X. Can, V. T. Thuat // Technology. – 2020. – Vol. 11, No. 10. – P. 1715–1723.

55. Chao, K.-H. An Intelligent Traffic Light Control Based on Extension Neural Network / K.-H. Chao, R.-H. Lee, M.-H. Wang // Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, 12th International Conference, KES 2008. – Zagreb, Croatia, 2008. – P. 34–38.

56. Chao, K.-H. An Intelligent Traffic Flow Control System Based on Radio Frequency Identification and Wireless Sensor Networks / K.-H. Chao, P.-Y. Chen // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2014. – № 4. – P. 34–38.

57. Тимофеева, О. П. Обучение нейронной сети интеллектуальной системы управления городскими светофорами / О. П. Тимофеева, С. С. Палицына // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2016. – № 1 (112). – С. 25–31.

58. Тимофеева, О. П. Проектирование интеллектуальной системы управления светофорами на основе нейронной сети / О. П. Тимофеева, Е. М. Малышева, Ю. В. Соколова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 238–244.

59. Niittymäki, J. Traffic Signal Controller Based on Fuzzy Logic / J. Niittymäki, V. Kononen // Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. – Nashville, Tenn, USA, 2000. – Vol. 5. – P. 3578–3581.

60. Niittymäki, J. Fuzzy Traffic Signal Control and a New Conference Method – Maximal Fuzzy Similarity / J. Niittymäki, R. Nevala, E. Turunen // Proceedings of the 13th Mini-EURO Conference (Handling Uncertainty in the Analysis of Traffic and Transportation Systems) and the 9th Mtg. EURO Working Group on Transportation (Intermodality, Sustainability and Intelligent Transportation Systems). – 2001. – P. 716–728.

61. Павлов, А. Н. Принятие решений в условиях нечеткой информации: учеб. пособие / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов. – СПб. : ГУАП, 2006. – 72 с.

62. Yang, Z. Hierarchical Fuzzy Logic Traffic Controller for Urban Signalized Intersections / Z. Yang, X. Huang, C. Du, M. Tang, F. Yang // Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA'08). – Chongqing, China, 2008. – P. 5197–5202.

63. Андронов, Р. В. Моделирование транспортных пересечений городских улиц с адаптивным регулированием дорожного движения / Р. В. Андронов, Е. Э. Леверенц, Т. В. Мальцева // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2022. – Т. 8, № 1 (29). – С. 144–160.

64. Бабичева, Т. С. Обобщение модели равновесного распределения транспортных потоков Бэкманна на случай учета затрат на преодоление перекрестков. / Т. С. Бабичева // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. Часть VII Управление и прикладная математика : труды 57-й научной конференции МФТИ. – М. : МФТИ, 2014. – С. 124–132.

65. Ваксман, С. А. Некоторые закономерности изменения интенсивности движения в транспортных узлах крупных городов / С. А. Ваксман // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов. Материалы третьей международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: Комвакс, 1996. – С. 43–47.

66. Капский, Д. В. Разработка модели транспортных потоков на улично-дорожной сети города / Д. В. Капский, Д. В. Навой, П. А. Пегин // Наука и техника. – 2019. – Т. 18, № 1. – С. 47–54.

67. Карамзин, Ю. Н. Двумерная модель автомобильных потоков / Ю. Н. Карамзин, М. А. Трапезникова, Б. Н. Четверушкин, Н. Г. Чурбанова // Математическое моделирование. – 2006. – Т. 18, № 6. – С. 85–95.

68. Колесов, В. И. Идентификация модели реального транспортного потока в городе / В. И. Колесов, М. Л. Гуляев, А. М. Осипенко // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2011. – № 10 (29). – С. 43–48.

69. Малюгин, П. Н. Измерение и расчет параметров транспортных потоков / П. Н. Малюгин, Е. В. Парсаев. – Омск : СибАДИ, 2012. – 25 с.

70. Обидина, Т. С. Исследование задержек, возникающих при пересечении перекрестка, с точки зрения теории массового обслуживания / Т. С. Обидина // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. Часть VII Управление и прикладная математика : труды 56-й научной конференции МФТИ. – М. : МФТИ, 2013. – С. 56–62.

71. Швецов, В. И. Математическое моделирование транспортных потоков / В. И. Швецов // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 11. – С. 37–46.

72. Якимов, М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов: монография / М. Р. Якимов. – М. : ЛОГОС, 2013. – 188 с.

73. Марковнина, А. И. Прогнозирование поведения транспортных потоков с помощью имитационного моделирования / А. И. Марковнина, В. С. Макаров // Инфраструктура и эксплуатация наземного транспорта. В 2-х частях : материалы международной студенческой научно-практической конференции. Нижний Новгород, 10 апреля 2019 года. Часть 2. – Нижний Новгород : «Научно-издательский центр «21 век», 2019. – С. 265–269.

74. Пильгейкина, И. А. Особенности прогнозирования транспортных потоков в малых городах / И. А. Пильгейкина, А. А. Власов, М. И. Семушкина // Образование и наука в современном мире. – 2021. – № 4 (35). – С. 184–190.

75. Портнов, Е. М. Разработка алгоритма прогнозирования состояний транспортных потоков и светофорных объектов / Е. М. Портнов, А. Р. Федоров, П. А. Федоров // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 11. – С. 249–253.

76. Яковенко, О. Л. Прогнозирование транспортных потоков в режиме реального времени для городов и мегаполисов / О. Л. Яковенко // Инновационное развитие транспорта: материалы III Всероссийской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов, Санкт-Петербург, 23 апреля 2018 года. – Санкт-Петербург: Редакционно-издательский центр «КУЛЬТ-ИНФОРМ-ПРЕСС», 2018. – С. 75–80.

77. Ахмадинуров, М. М. Модели массового обслуживания в задаче оптимизации работы светофора / М. М. Ахмадинуров, Г. А. Тимофеева // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 3, № 1(57). – С. 217-227.

78. Введение в математическое моделирование транспортных потоков : учеб. пособие / А. В. Гасников, С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский [и др.] – М. : Издательство МЦНМО, 2010. – 362 с.

79. Ломакин, Д. О. Мезоскопические модели транспортных потоков / Д. О. Ломакин // Информационные технологии и инновации на транспорте: материалы 2-ой международной научно-практической конференции, Орел 17-18 мая 2016 г. / под общей редакцией А. Н. Новикова. – Орел : ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева», 2016. – С. 53–59.

80. Beckmann, M. J. Studies in the Economics of Transportation / M. J. Beckmann, C. B. McGuire, C. B. Winsten. – Yale University Press: New Heaven, 1956. – 249 p.

81. McNeil, D. R. A Solution to the Fixed-Cycle Traffic Light Problem for Compound Poisson Arrivals / D. R. McNeil. // J. Appl. Prob. – No. 5. – 1968. P. 624–635.

82. Darroch, J. N. On the Traffic-Light Queue / J. N. Darroch // Ann. Math. Statist. – 1964. – Vol. 35. – P. 122–128.

83. Darroch, J. N. Queues for a Vehicle-Actuated Traffic Light / J. N. Darroch, G. F. Newell, R. W. J. Morris // *Operational Research*. – 1964. – Vol. 12. – P. 288–293.
84. Webster, F. V. Traffic Signal Settings / F. V. Webster // *Road Research Laboratory Technical Paper*, HMSO, London. – 1958. – No. 39. – P. 9–15.
85. Miller, A. J. Settings for Fixed-Cycle Traffic Signals / A. J. Miller // *Operational Research Quarterly*. – 1963. – Vol. 14. – P. 373–386.
86. Newell, G. F. Queues for a Fixed-Cycle Traffic Light / G. F. Newell // *The Annals of Mathematical Statistics*. – 1960. – Vol. 31, No. 3. – P. 589–597.
87. Ижунинов, М. А. Анализ возможностей сетей 5G / М. А. Ижунинов // *Молодой ученый*. – 2020. – № 46 (336). – С. 10–12.
88. Применение облачных вычислений для анализа данных большого объема в умных городах / Р. Массобрио, С. Несмачнов, А. Черных [и др.] // *Труды Института системного программирования РАН*. – 2016. – Т. 28, № 6. – С. 121–140.
89. Хаханов, В. И. Зеленая волна – облако мониторинга и управления дорожным движением / В. И. Хаханов // *Автоматизированные системы управления*. – 2012. – № 160. – С. 4–21.
90. IoT Based Traffic Management System / S. Shashank, P. Kiran, D. Nischay [et al.] // *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology (IJSRCSEIT)*. – 2021. – Vol. 7, No. 4. – P. 184–187.
91. Антониади, Г. Д. Математическая модель задержки автотранспорта на регулируемом перекрестке / Г. Д. Антониади, В. О. Архипов, А. А. Цуприков // *Информационные технологии*. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 210–215.
92. Антониади, Г. Д. Анализ модели задержки Вебстера / Г. Д. Антониади, В. О. Архипов, А. А. Цуприков // *Евразийский союз ученых (ЕСУ)* – 2018. – №11 (56). – С. 6–12.
93. Румшицкий, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента: справочное руководство / Л. З. Румшицкий. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
94. ОДМ 218.2.020-2012 Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог. – М.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2012. – 148 с.

95. Морозов, В. В. Интенсивность как параметр транспортного потока / В. В. Морозов, С. А. Ярков // Организация и безопасность дорожного движения : материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф., 12 марта 2015 г. – Тюмень: ТюмГНГУ. 2015. – С. 214–218.

96. Стрижко, М. А. Исследование моделей задержки автотранспорта на перекрестках М. Дж. Бэкманна и Ф. Вебстера для условий мегаполиса / М. А. Стрижко, В. В. Червинский // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 44–50. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54198808> (дата обращения 12.11.2024).

97. Стрижко, М. А. Модификация модели задержки транспортных средств М. Дж. Бэкманна для взаимосвязанных перекрёстков в условиях мегаполиса / М. А. Стрижко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 6 (236). – С. 222–230. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=60030673> (дата обращения 12.11.2024).

98. ОДМ 218.6.003-2011 Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. – М. : Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2015. – 51 с.

99. Стрижко, М. А. Нейросетевое прогнозирование параметров транспортных потоков в интеллектуальных системах светофорного регулирования / М. А. Стрижко // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2024. – № 2 (24). – С. 45–53. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67904863> (дата обращения 12.11.2024).

100. Стрижко, М. А. Применение нечеткой логики в системах интеллектуального управления светофорами / М. А. Стрижко, В. В. Червинский // Информатика и кибернетика. – 2022. – № 2 (28). – С. 5–10. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53947636> (дата обращения 12.11.2024).

101. Стрижко, М. А. Система интеллектуального управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием / М. А. Стрижко, В. В. Червинский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – Т. 20, № 2. – С. 48–55. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67875906> (дата обращения 12.11.2024).

Приложение А

Нечеткие правила системы управления автотранспортными потоками

№	Правило	№	Правило
1	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RB=C \ \& \ RS=C \rightarrow T=M$	43	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RB=F \ \& \ RS=C \rightarrow T=L$
2	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RB=C \ \& \ RS=M \rightarrow T=AH$	44	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RB=F \ \& \ RS=M \rightarrow T=L$
3	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RB=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$	45	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RB=F \ \& \ RS=F \rightarrow T=L$
4	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RB=M \ \& \ RS=C \rightarrow T=AL$	46	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RM=C \ \& \ RS=C \rightarrow T=L$
5	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RB=M \ \& \ RS=M \rightarrow T=M$	47	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RM=C \ \& \ RS=M \rightarrow T=AL$
6	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RB=M \ \& \ RS=F \rightarrow T=AH$	48	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RM=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=M$
7	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RB=F \ \& \ RS=C \rightarrow T=L$	49	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RM=M \ \& \ RS=C \rightarrow T=L$
8	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RB=F \ \& \ RS=M \rightarrow T=AL$	50	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RM=M \ \& \ RS=M \rightarrow T=L$
9	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RB=F \ \& \ RS=F \rightarrow T=M$	51	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RM=M \ \& \ RS=F \rightarrow T=AL$
10	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RM=C \ \& \ RS=C \rightarrow T=M$	52	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RM=F \ \& \ RS=C \rightarrow T=L$
11	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RM=C \ \& \ RS=M \rightarrow T=AH$	53	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RM=F \ \& \ RS=M \rightarrow T=L$
12	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RM=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$	54	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RM=F \ \& \ RS=F \rightarrow T=L$
13	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RM=M \ \& \ RS=C \rightarrow T=AL$	55	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RB=C \ \& \ RS=C \rightarrow T=AH$
14	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RM=M \ \& \ RS=M \rightarrow T=M$	56	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RB=C \ \& \ RS=M \rightarrow T=H$
15	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RM=M \ \& \ RS=F \rightarrow T=AH$	57	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RB=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$
16	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RM=F \ \& \ RS=C \rightarrow T=L$	58	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RB=M \ \& \ RS=C \rightarrow T=M$
17	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RM=F \ \& \ RS=M \rightarrow T=AL$	59	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RB=M \ \& \ RS=M \rightarrow T=AH$
18	$GB=C \ \& \ GS=C \ \& \ RM=F \ \& \ RS=F \rightarrow T=M$	60	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RB=M \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$
19	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RB=C \ \& \ RS=C \rightarrow T=AL$	61	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RB=F \ \& \ RS=C \rightarrow T=AL$
20	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RB=C \ \& \ RS=M \rightarrow T=M$	62	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RB=F \ \& \ RS=M \rightarrow T=M$
21	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RB=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=AH$	63	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RB=F \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$
22	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RB=M \ \& \ RS=C \rightarrow T=L$	64	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RM=C \ \& \ RS=C \rightarrow T=AH$
23	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RB=M \ \& \ RS=M \rightarrow T=AL$	65	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RM=C \ \& \ RS=M \rightarrow T=H$
24	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RB=M \ \& \ RS=F \rightarrow T=M$	66	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RM=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$
25	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RB=F \ \& \ RS=C \rightarrow T=L$	67	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RM=M \ \& \ RS=C \rightarrow T=M$
26	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RB=F \ \& \ RS=M \rightarrow T=L$	68	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RM=M \ \& \ RS=M \rightarrow T=AH$
27	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RB=F \ \& \ RS=F \rightarrow T=AL$	69	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RM=M \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$
28	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RM=C \ \& \ RS=C \rightarrow T=AL$	70	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RM=F \ \& \ RS=C \rightarrow T=AL$
29	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RM=C \ \& \ RS=M \rightarrow T=M$	71	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RM=F \ \& \ RS=M \rightarrow T=M$
30	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RM=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=AH$	72	$GB=M \ \& \ GS=C \ \& \ RM=F \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$
31	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RM=M \ \& \ RS=C \rightarrow T=L$	73	$GB=M \ \& \ GS=M \ \& \ RB=C \ \& \ RS=C \rightarrow T=M$
32	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RM=M \ \& \ RS=M \rightarrow T=AL$	74	$GB=M \ \& \ GS=M \ \& \ RB=C \ \& \ RS=M \rightarrow T=AH$
33	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RM=M \ \& \ RS=F \rightarrow T=M$	75	$GB=M \ \& \ GS=M \ \& \ RB=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$
34	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RM=F \ \& \ RS=C \rightarrow T=L$	76	$GB=M \ \& \ GS=M \ \& \ RB=M \ \& \ RS=C \rightarrow T=AL$
35	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RM=F \ \& \ RS=M \rightarrow T=L$	77	$GB=M \ \& \ GS=M \ \& \ RB=M \ \& \ RS=M \rightarrow T=M$
36	$GB=C \ \& \ GS=M \ \& \ RM=F \ \& \ RS=F \rightarrow T=AL$	78	$GB=M \ \& \ GS=M \ \& \ RB=M \ \& \ RS=F \rightarrow T=AH$
37	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RB=C \ \& \ RS=C \rightarrow T=L$	79	$GB=M \ \& \ GS=M \ \& \ RB=F \ \& \ RS=C \rightarrow T=L$
38	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RB=C \ \& \ RS=M \rightarrow T=AL$	80	$GB=M \ \& \ GS=M \ \& \ RB=F \ \& \ RS=M \rightarrow T=AL$
39	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RB=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=M$	81	$GB=M \ \& \ GS=M \ \& \ RB=F \ \& \ RS=F \rightarrow T=M$
40	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RB=M \ \& \ RS=C \rightarrow T=L$	82	$GB=M \ \& \ GS=M \ \& \ RM=C \ \& \ RS=C \rightarrow T=M$
41	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RB=M \ \& \ RS=M \rightarrow T=L$	83	$GB=M \ \& \ GS=M \ \& \ RM=C \ \& \ RS=M \rightarrow T=AH$
42	$GB=C \ \& \ GS=F \ \& \ RB=M \ \& \ RS=F \rightarrow T=AL$	84	$GB=M \ \& \ GS=M \ \& \ RM=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$

№	Правило	№	Правило
85	GB=M & GS=M & RM=M & RS=C→T=AL	132	GB=F & GS=M & RB=M & RS=F →T=H
86	GB=M & GS=M & RM=M & RS=M→T=ML	133	GB=F & GS=M & RB=F & RS=C →T= AL
87	GB=M & GS=M & RM=M & RS=F→T=AH	134	GB=F & GS=M & RB=F & RS=M →T= M
88	GB=M & GS=M & RM=F & RS=C →T= L	135	GB=F & GS=M & RB=F & RS=F →T= AH
89	GB=M & GS=M & RM=F & RS=M →T= AL	136	GB=F & GS=M & RM=C & RS=C →T=AH
90	GB=M & GS=M & RM=F & RS=F →T= M	137	GB=F & GS=M & RM=C & RS=M →T=H
91	GB=M & GS=F & RB=C & RS=C →T=L	138	GB=F & GS=M & RM=C & RS=F →T=H
92	GB=M & GS=F & RB=C & RS=M→T=AL	139	GB=F & GS=M & RM=M & RS=C →T=M
93	GB=M & GS=F & RB=C & RS=F →T=M	140	GB=F & GS=M & RM=M & RS=M →T=AH
94	GB=M & GS=F & RB=M & RS=C→T=L	141	GB=F & GS=M & RM=M & RS=F →T=H
95	GB=M & GS=F & RB=M & RS=M→T=L	142	GB=F & GS=M & RM=F & RS=C →T= AL
96	GB=M & GS=F & RB=M & RS=F →T=AL	143	GB=F & GS=M & RM=F & RS=M →T= M
97	GB=M & GS=F & RB=F & RS=C →T= L	144	GB=F & GS=M & RM=F & RS=F →T= AH
98	GB=M & GS=F & RB=F & RS=M→T= L	145	GB=F & GS=F & RB=C & RS=C →T=M
99	GB=M & GS=F & RB=F & RS=F →T= L	146	GB=F & GS=F & RB=C & RS=M →T=AH
100	GB=M & GS=F & RM=C & RS=C→T=L	147	GB=F & GS=F & RB=C & RS=F →T=H
101	GB=M & GS=F & RM=C & RS=M→T=AL	148	GB=F & GS=F & RB=M & RS=C →T=AL
102	GB=M & GS=F & RM=C & RS=F →T=M	149	GB=F & GS=F & RB=M & RS=M →T=M
103	GB=M & GS=F & RM=M & RS=C →T=L	150	GB=F & GS=F & RB=M & RS=F →T=AH
104	GB=M & GS=F & RM=M & RS=M →T=L	151	GB=F & GS=F & RB=F & RS=C →T= L
105	GB=M & GS=F & RM=M & RS=F →T=AL	152	GB=F & GS=F & RB=F & RS=M →T= AL
106	GB=M & GS=F & RM=F & RS=C →T= L	153	GB=F & GS=F & RB=F & RS=F →T= M
107	GB=M & GS=F & RM=F & RS=M →T= L	154	GB=F & GS=F & RM=C & RS=C →T=M
108	GB=M & GS=F & RM=F & RS=F →T= L	155	GB=F & GS=F & RM=C & RS=M →T=AH
109	GB=F & GS=C & RB=C & RS=C →T=H	156	GB=F & GS=F & RM=C & RS=F →T=H
110	GB=F & GS=C & RB=C & RS=M→T=H	157	GB=F & GS=F & RM=M & RS=C →T=AL
111	GB=F & GS=C & RB=C & RS=F →T=H	158	GB=F & GS=F & RM=M & RS=M →T=M
112	GB=F & GS=C & RB=M & RS=C→T=AH	159	GB=F & GS=F & RM=M & RS=F →T=AH
113	GB=F & GS=C & RB=M & RS=M →T=H	160	GB=F & GS=F & RM=F & RS=C →T= L
114	GB=F & GS=C & RB=M & RS=F →T=H	161	GB=F & GS=F & RM=F & RS=M →T= AL
115	GB=F & GS=C & RB=F & RS=C →T= M	162	GB=F & GS=F & RM=F & RS=F →T= M
116	GB=F & GS=C & RB=F & RS=M →T= AH	163	GM=C & GS=C & RB=C & RS=C →T=M
117	GB=F & GS=C & RB=F & RS=F →T= H	164	GM=C & GS=C & RB=C & RS=M →T=AH
118	GB=F & GS=C & RM=C & RS=C →T=H	165	GM=C & GS=C & RB=C & RS=F →T=H
119	GB=F & GS=C & RM=C & RS=M →T=H	166	GM=C & GS=C & RB=M & RS=C →T=AL
120	GB=F & GS=C & RM=C & RS=F →T=H	167	GM=C & GS=C & RB=M & RS=M →T=M
121	GB=F & GS=C & RM=M & RS=C →T=AH	168	GM=C & GS=C & RB=M & RS=F →T=AH
122	GB=F & GS=C & RM=M & RS=M →T=H	169	GM=C & GS=C & RB=F & RS=C →T= L
123	GB=F & GS=C & RM=M & RS=F →T=H	170	GM=C & GS=C & RB=F & RS=M →T= AL
124	GB=F & GS=C & RM=F & RS=C →T=M	171	GM=C & GS=C & RB=F & RS=F →T= M
125	GB=F & GS=C & RM=F & RS=M →T= AH	172	GM=C & GS=C & RM=C & RS=C →T=M
126	GB=F & GS=C & RM=F & RS=F →T= H	173	GM=C & GS=C & RM=C & RS=M →T=AH
127	GB=F & GS=M & RB=C & RS=C→T=AH	174	GM=C & GS=C & RM=C & RS=F →T=H
128	GB=F & GS=M & RB=C & RS=M →T=H	175	GM=C & GS=C & RM=M & RS=C →T=AL
129	GB=F & GS=M & RB=C & RS=F →T=H	176	GM=C & GS=C & RM=M & RS=M →T=M
130	GB=F & GS=M & RB=M & RS=C →T=M	177	GM=C & GS=C & RM=M & RS=F →T=AH
131	GB=F & GS=M & RB=M & RS=M →T=AH	178	GM=C & GS=C & RM=F & RS=C →T= L

№	Правило	№	Правило
179	$GM=C \& GS=C \& RM=F \& RS=M \rightarrow T=AL$	226	$GM=M \& GS=C \& RM=C \& RS=C \rightarrow T=AH$
180	$GM=C \& GS=C \& RM=F \& RS=F \rightarrow T= M$	227	$GM=M \& GS=C \& RM=C \& RS=M \rightarrow T=H$
181	$GM=C \& GS=M \& RB=C \& RS=C \rightarrow T=AL$	228	$GM=M \& GS=C \& RM=C \& RS=F \rightarrow T=H$
182	$GM=C \& GS=M \& RB=C \& RS=M \rightarrow T=M$	229	$GM=M \& GS=C \& RM=M \& RS=C \rightarrow T=M$
183	$GM=C \& GS=M \& RB=C \& RS=F \rightarrow T=AH$	230	$GM=M \& GS=C \& RM=M \& RS=M \rightarrow T=AH$
184	$GM=C \& GS=M \& RB=M \& RS=C \rightarrow T=L$	231	$GM=M \& GS=C \& RM=M \& RS=F \rightarrow T=H$
185	$GM=C \& GS=M \& RB=M \& RS=M \rightarrow T=AL$	232	$GM=M \& GS=C \& RM=F \& RS=C \rightarrow T=AL$
186	$GM=C \& GS=M \& RB=M \& RS=F \rightarrow T=M$	233	$GM=M \& GS=C \& RM=F \& RS=M \rightarrow T= M$
187	$GM=C \& GS=M \& RB=F \& RS=C \rightarrow T= L$	234	$GM=M \& GS=C \& RM=F \& RS=F \rightarrow T= H$
188	$GM=C \& GS=M \& RB=F \& RS=M \rightarrow T= L$	235	$GM=M \& GS=M \& RB=C \& RS=C \rightarrow T=M$
189	$GM=C \& GS=M \& RB=F \& RS=F \rightarrow T= AL$	236	$GM=M \& GS=M \& RB=C \& RS=M \rightarrow T=AH$
190	$GM=C \& GS=M \& RM=C \& RS=C \rightarrow T=AL$	237	$GM=M \& GS=M \& RB=C \& RS=F \rightarrow T=H$
191	$GM=C \& GS=M \& RM=C \& RS=M \rightarrow T=M$	238	$GM=M \& GS=M \& RB=M \& RS=C \rightarrow T=AL$
192	$GM=C \& GS=M \& RM=C \& RS=F \rightarrow T=AH$	239	$GM=M \& GS=M \& RB=M \& RS=M \rightarrow T=M$
193	$GM=C \& GS=M \& RM=M \& RS=C \rightarrow T=L$	240	$GM=M \& GS=M \& RB=M \& RS=F \rightarrow T=AH$
194	$GM=C \& GS=M \& RM=M \& RS=M \rightarrow T=AL$	241	$GM=M \& GS=M \& RB=F \& RS=C \rightarrow T= L$
195	$GM=C \& GS=M \& RM=M \& RS=F \rightarrow T=M$	242	$GM=M \& GS=M \& RB=F \& RS=M \rightarrow T= AL$
196	$GM=C \& GS=M \& RM=F \& RS=C \rightarrow T= L$	243	$GM=M \& GS=M \& RB=F \& RS=F \rightarrow T= M$
197	$GM=C \& GS=M \& RM=F \& RS=M \rightarrow T= L$	244	$GM=M \& GS=M \& RM=C \& RS=C \rightarrow T=M$
198	$GM=C \& GS=M \& RM=F \& RS=F \rightarrow T= AL$	245	$GM=M \& GS=M \& RM=C \& RS=M \rightarrow T=AH$
199	$GM=C \& GS=F \& RB=C \& RS=C \rightarrow T=L$	246	$GM=M \& GS=M \& RM=C \& RS=F \rightarrow T=H$
200	$GM=C \& GS=F \& RB=C \& RS=M \rightarrow T=AL$	247	$GM=M \& GS=M \& RM=M \& RS=C \rightarrow T=AL$
201	$GM=C \& GS=F \& RB=C \& RS=F \rightarrow T=M$	248	$GM=M \& GS=M \& RM=M \& RS=M \rightarrow T=ML$
202	$GM=C \& GS=F \& RB=M \& RS=C \rightarrow T=L$	249	$GM=M \& GS=M \& RM=M \& RS=F \rightarrow T=AH$
203	$GM=C \& GS=F \& RB=M \& RS=M \rightarrow T=L$	250	$GM=M \& GS=M \& RM=F \& RS=C \rightarrow T= L$
204	$GM=C \& GS=F \& RB=M \& RS=F \rightarrow T=AL$	251	$GM=M \& GS=M \& RM=F \& RS=M \rightarrow T= AL$
205	$GM=C \& GS=F \& RB=F \& RS=C \rightarrow T= L$	252	$GM=M \& GS=M \& RM=F \& RS=F \rightarrow T= M$
206	$GM=C \& GS=F \& RB=F \& RS=M \rightarrow T= L$	253	$GM=M \& GS=F \& RB=C \& RS=C \rightarrow T=L$
207	$GM=C \& GS=F \& RB=F \& RS=F \rightarrow T= L$	254	$GM=M \& GS=F \& RB=C \& RS=M \rightarrow T=AL$
208	$GM=C \& GS=F \& RM=C \& RS=C \rightarrow T=L$	255	$GM=M \& GS=F \& RB=C \& RS=F \rightarrow T=M$
209	$GM=C \& GS=F \& RM=C \& RS=M \rightarrow T=AL$	256	$GM=M \& GS=F \& RB=M \& RS=C \rightarrow T=L$
210	$GM=C \& GS=F \& RM=C \& RS=F \rightarrow T=M$	257	$GM=M \& GS=F \& RB=M \& RS=M \rightarrow T=L$
211	$GM=C \& GS=F \& RM=M \& RS=C \rightarrow T=L$	258	$GM=M \& GS=F \& RB=M \& RS=F \rightarrow T=AL$
212	$GM=C \& GS=F \& RM=M \& RS=M \rightarrow T=L$	259	$GM=M \& GS=F \& RB=F \& RS=C \rightarrow T= L$
213	$GM=C \& GS=F \& RM=M \& RS=F \rightarrow T=AL$	260	$GM=M \& GS=F \& RB=F \& RS=M \rightarrow T= L$
214	$GM=C \& GS=F \& RM=F \& RS=C \rightarrow T= L$	261	$GM=M \& GS=F \& RB=F \& RS=F \rightarrow T= L$
215	$GM=C \& GS=F \& RM=F \& RS=M \rightarrow T= L$	262	$GM=M \& GS=F \& RM=C \& RS=C \rightarrow T=L$
216	$GM=C \& GS=F \& RM=F \& RS=F \rightarrow T= L$	263	$GM=M \& GS=F \& RM=C \& RS=M \rightarrow T=AL$
217	$GM=M \& GS=C \& RB=C \& RS=C \rightarrow T=AH$	264	$GM=M \& GS=F \& RM=C \& RS=F \rightarrow T=M$
218	$GM=M \& GS=C \& RB=C \& RS=M \rightarrow T=H$	265	$GM=M \& GS=F \& RM=M \& RS=C \rightarrow T=L$
219	$GM=M \& GS=C \& RB=C \& RS=F \rightarrow T=H$	266	$GM=M \& GS=F \& RM=M \& RS=M \rightarrow T=L$
220	$GM=M \& GS=C \& RB=M \& RS=C \rightarrow T=M$	267	$GM=M \& GS=F \& RM=M \& RS=F \rightarrow T=AL$
221	$GM=M \& GS=C \& RB=M \& RS=M \rightarrow T=AH$	268	$GM=M \& GS=F \& RM=F \& RS=C \rightarrow T= L$
222	$GM=M \& GS=C \& RB=M \& RS=F \rightarrow T=H$	269	$GM=M \& GS=F \& RM=F \& RS=M \rightarrow T= L$
223	$GM=M \& GS=C \& RB=F \& RS=C \rightarrow T= AL$	270	$GM=M \& GS=F \& RM=F \& RS=F \rightarrow T= L$
224	$GM=M \& GS=C \& RB=F \& RS=M \rightarrow T= M$	271	$GM=F \& GS=C \&$

№	Правило	№	Правило
273	$GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RB=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$	299	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RM=C \ \& \ RS=M \rightarrow T=H$
274	$GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RB=M \ \& \ RS=C \rightarrow T=AH$	300	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RM=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$
275	$GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RB=M \ \& \ RS=M \rightarrow T=H$	301	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RM=M \ \& \ RS=C \rightarrow T=M$
276	$GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RB=M \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$	302	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RM=M \ \& \ RS=M \rightarrow T=AH$
277	$GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RB=F \ \& \ RS=C \rightarrow T= M$	303	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RM=M \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$
278	$GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RB=F \ \& \ RS=M \rightarrow T= AH$	304	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RM=F \ \& \ RS=C \rightarrow T= AL$
279	$GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RB=F \ \& \ RS=F \rightarrow T= H$	305	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RM=F \ \& \ RS=M \rightarrow T= M$
280	$GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RM=C \ \& \ RS=C \rightarrow T=H$	306	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RM=F \ \& \ RS=F \rightarrow T= AH$
281	$GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RM=C \ \& \ RS=M \rightarrow T=H$	307	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RB=C \ \& \ RS=C \rightarrow T=M$
282	$GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RM=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$	308	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RB=C \ \& \ RS=M \rightarrow T=AH$
283	$GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RM=M \ \& \ RS=C \rightarrow T=AH$	309	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RB=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$
284	$GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RM=M \ \& \ RS=M \rightarrow T=H$	310	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RB=M \ \& \ RS=C \rightarrow T=AL$
285	$GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RM=M \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$	311	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RB=M \ \& \ RS=M \rightarrow T=M$
286	$GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RM=F \ \& \ RS=C \rightarrow T=M$	312	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RB=M \ \& \ RS=F \rightarrow T=AH$
287	$GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RM=F \ \& \ RS=M \rightarrow T= AH$	313	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RB=F \ \& \ RS=C \rightarrow T= L$
288	$GM=F \ \& \ GS=C \ \& \ RM=F \ \& \ RS=F \rightarrow T= H$	314	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RB=F \ \& \ RS=M \rightarrow T= AL$
289	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RB=C \ \& \ RS=C \rightarrow T=AH$	315	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RB=F \ \& \ RS=F \rightarrow T= M$
290	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RB=C \ \& \ RS=M \rightarrow T=H$	316	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RM=C \ \& \ RS=C \rightarrow T=M$
291	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RB=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$	317	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RM=C \ \& \ RS=M \rightarrow T=AH$
292	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RB=M \ \& \ RS=C \rightarrow T=M$	318	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RM=C \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$
293	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RB=M \ \& \ RS=M \rightarrow T=AH$	319	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RM=M \ \& \ RS=C \rightarrow T=AL$
294	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RB=M \ \& \ RS=F \rightarrow T=H$	320	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RM=M \ \& \ RS=M \rightarrow T=M$
295	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RB=F \ \& \ RS=C \rightarrow T= AL$	321	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RM=M \ \& \ RS=F \rightarrow T=AH$
296	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RB=F \ \& \ RS=M \rightarrow T= M$	322	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RM=F \ \& \ RS=C \rightarrow T= L$
297	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RB=F \ \& \ RS=F \rightarrow T= AH$	323	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RM=F \ \& \ RS=M \rightarrow T= AL$
298	$GM=F \ \& \ GS=M \ \& \ RM=C \ \& \ RS=C \rightarrow T=AH$	324	$GM=F \ \& \ GS=F \ \& \ RM=F \ \& \ RS=F \rightarrow T= M$

Приложение Б

**Результаты моделирования работы системы управления
с полной информацией об объекте**

Тип	Перекресток	Направление	Среднее время ожидания, с					Средняя длина очереди, авт.				
			«Жесткое» управление	Система Ниттимаки	Изменение качества, %	Модиф. система	Изменение качества, %	«Жесткое» управление	Система Ниттимаки	Изменение качества, %	Модиф. система	Изменение качества, %
Донецк												
2	Артема Панфилова	СЮ	23,91	17,49	-26,82	13,08	-45,30	1,12	0,82	-26,57	0,61	-45,68
		ЮС	29,28	21,87	-25,30	14,40	-50,81	1,38	1,03	-25,05	0,67	-51,15
		ЗВ	25,47	23,72	-6,86	14,29	-43,90	1,20	1,12	-6,54	0,67	-44,29
2	Артема Осв. Донбасса	СЮ	25,11	21,79	-13,21	13,48	-46,31	1,18	1,03	-12,91	0,63	-46,68
		ЮС	29,20	21,21	-27,34	12,10	-58,57	1,37	1,00	-27,09	0,56	-58,85
		ЗВ	27,96	20,62	-26,26	13,79	-50,67	1,31	0,97	-26,01	0,64	-51,01
2	Артема Титова	СЮ	24,76	20,81	-15,92	11,87	-52,06	1,16	0,98	-15,63	0,55	-52,39
		ЮС	19,69	18,91	-3,98	13,71	-30,38	0,92	0,89	-3,66	0,64	-30,86
		ЗВ	28,73	20,17	-29,78	12,28	-57,26	1,35	0,95	-29,54	0,57	-57,56
		ВЗ	33,94	18,60	-45,19	14,59	-57,02	1,59	0,88	-45,01	0,68	-57,32
2	Артема Мира	СЮ	26,56	22,46	-15,43	13,67	-48,51	1,25	1,06	-15,14	0,64	-48,87
		ЮС	21,33	19,65	-7,85	13,76	-35,47	1,00	0,93	-7,53	0,64	-35,92
		ЗВ	23,53	20,04	-14,82	14,15	-39,84	1,11	0,94	-14,53	0,66	-40,26
		ВЗ	24,79	23,48	-5,30	14,18	-42,80	1,16	1,11	-4,97	0,66	-43,20
2	Артема Ватутина	СЮ	23,35	19,06	-18,37	13,41	-42,58	1,10	0,90	-18,09	0,63	-42,98
		ЮС	27,51	20,03	-27,18	13,99	-49,14	1,29	0,94	-26,93	0,65	-49,49
		ЗВ	26,85	20,46	-23,80	12,74	-52,57	1,26	0,96	-23,53	0,59	-52,90
		ВЗ	31,56	22,36	-29,14	16,17	-48,77	1,48	1,05	-28,90	0,75	-49,12
3	Артема Б.Хмельницкого	СЮ	31,67	32,23	1,75	29,70	-6,22	2,57	2,61	1,55	2,42	-6,13
		ЮС	34,61	30,52	-11,82	27,10	-21,70	2,81	2,48	-12,00	2,20	-21,62
		ЗВ	32,30	29,22	-9,51	29,56	-8,46	2,62	2,37	-9,69	2,40	-8,36
		ВЗ	28,45	28,24	-0,74	27,13	-4,65	2,31	2,29	-0,94	2,21	-4,55
2	Университетская Панфилова	ЮС	24,25	18,65	-23,10	13,60	-43,90	1,14	0,88	-22,84	0,63	-44,29
		ЗВ	23,80	19,55	-17,88	17,14	-27,98	1,12	0,92	-17,60	0,80	-28,48
		ВЗ	23,62	21,90	-7,27	14,51	-38,57	1,11	1,03	-6,95	0,68	-39,00
2	Университетская Осв. Донбасса	ЮС	22,60	19,58	-13,36	14,83	-34,38	1,06	0,92	-13,06	0,69	-34,83
		ЗВ	26,19	19,28	-26,38	12,19	-53,45	1,23	0,91	-26,13	0,57	-53,77
		ВЗ	23,79	21,23	-10,77	12,19	-48,77	1,12	1,00	-10,47	0,57	-49,12
2	Университетская Титова	ЮС	27,94	21,26	-23,90	15,25	-45,42	1,31	1,00	-23,64	0,71	-45,79
		ЗВ	23,09	20,72	-10,27	12,70	-44,99	1,08	0,98	-9,96	0,59	-45,37
		ВЗ	25,75	19,78	-23,18	12,91	-49,85	1,21	0,93	-22,91	0,60	-50,20
2	Университетская Мира	ЮС	21,77	21,85	0,37	13,84	-36,44	1,02	1,03	0,71	0,65	-36,88
		ЗВ	24,35	18,53	-23,89	13,67	-43,86	1,14	0,87	-23,63	0,64	-44,25
		ВЗ	29,48	19,44	-34,05	11,87	-59,73	1,38	0,92	-33,82	0,55	-60,01
2	Университетская Ватутина	ЮС	30,78	20,28	-34,13	14,14	-54,06	1,45	0,96	-33,90	0,66	-54,38
		ЗВ	26,06	19,33	-25,83	13,77	-47,14	1,22	0,91	-25,57	0,64	-47,51
		ВЗ	26,34	20,56	-21,92	13,26	-49,64	1,24	0,97	-21,66	0,62	-49,99

Тип	Перекресток	Направление	Среднее время ожидания, с					Средняя длина очереди, авт.				
			«Жесткое» управление	Система Ниттимаки	Изменение качества, %	Модиф. система	Изменение качества, %	«Жесткое» управление	Система Ниттимаки	Изменение качества, %	Модиф. система	Изменение качества, %
3	Университетская Б.Хмельницкого	ЮС	33,59	28,45	-15,31	27,89	-16,98	2,73	2,31	-15,48	2,27	-16,89
		ЗВ	32,15	25,43	-20,89	24,70	-23,17	2,61	2,06	-21,05	2,01	-23,09
		ВЗ	34,33	28,37	-17,35	28,22	-17,80	2,79	2,30	-17,51	2,30	-17,71
1	Щорса Панфилова	СЮ	9,23	6,33	-31,43	4,12	-55,41	0,68	0,46	-31,57	0,30	-55,47
		ЗВ	14,20	6,77	-52,34	6,12	-56,91	1,04	0,50	-52,45	0,45	-56,97
		ВЗ	9,91	5,21	-47,45	5,42	-45,26	0,73	0,38	-47,56	0,40	-45,34
1	Щорса Осв. Донбасса	СЮ	9,86	6,44	-34,66	4,38	-55,56	0,73	0,47	-34,80	0,32	-55,62
		ЗВ	13,34	7,72	-42,15	4,84	-63,73	0,98	0,57	-42,28	0,36	-63,78
		ВЗ	19,90	4,59	-76,91	6,18	-68,96	1,46	0,34	-76,96	0,45	-69,00
1	Щорса Мира	СЮ	15,69	4,52	-71,20	5,85	-62,72	1,15	0,33	-71,26	0,43	-62,78
		ЗВ	14,50	7,92	-45,39	6,02	-58,47	1,07	0,58	-45,51	0,44	-58,53
		ВЗ	9,29	7,63	-17,87	5,61	-39,58	0,68	0,56	-18,05	0,41	-39,67
1	Щорса Ватутина	СЮ	14,17	5,48	-61,31	6,14	-56,66	1,04	0,40	-61,40	0,45	-56,72
		ЗВ	8,35	6,57	-21,25	5,52	-33,85	0,61	0,48	-21,42	0,41	-33,95
		ВЗ	13,41	8,39	-37,44	2,62	-80,49	0,99	0,62	-37,58	0,19	-80,52
2	Щорса Б.Хмельницкого	СЮ	25,23	19,61	-22,26	13,48	-46,57	1,18	0,92	-21,99	0,63	-46,94
		ЗВ	22,57	22,05	-2,33	14,19	-37,14	1,06	1,04	-1,99	0,66	-37,57
		ВЗ	25,89	19,25	-25,67	13,07	-49,52	1,22	0,91	-25,42	0,61	-49,87
1	Р. Люксембург Панфилова	СЮ	14,61	7,07	-51,60	4,64	-68,25	1,07	0,52	-51,71	0,34	-68,30
		ЮС	14,56	7,47	-48,68	5,96	-59,07	1,07	0,55	-48,79	0,44	-59,13
		ЗВ	11,40	5,84	-48,78	3,74	-67,21	0,84	0,43	-48,89	0,27	-67,26
		ВЗ	10,25	5,65	-44,89	6,84	-33,34	0,75	0,41	-45,01	0,50	-33,44
1	Р. Люксембург Мира	СЮ	8,27	6,39	-22,75	6,11	-26,08	0,61	0,47	-22,92	0,45	-26,19
		ЮС	13,84	4,55	-67,13	4,98	-64,00	1,02	0,33	-67,20	0,37	-64,05
		ЗВ	16,60	6,38	-61,56	4,98	-69,98	1,22	0,47	-61,64	0,37	-70,02
		ВЗ	9,86	5,76	-41,60	5,55	-43,70	0,73	0,42	-41,73	0,41	-43,79
1	Р. Люксембург Ватутина	СЮ	8,19	5,83	-28,84	5,58	-31,86	0,60	0,43	-28,99	0,41	-31,96
		ЮС	8,55	6,83	-20,18	5,01	-41,44	0,63	0,50	-20,36	0,37	-41,53
		ЗВ	12,70	6,61	-47,94	7,51	-40,88	0,93	0,49	-48,06	0,55	-40,96
		ВЗ	16,58	7,75	-53,27	4,76	-71,32	1,22	0,57	-53,37	0,35	-71,36
2	Р. Люксембург Б.Хмельницкого	СЮ	26,85	22,14	-17,55	13,60	-49,35	1,26	1,04	-17,27	0,63	-49,70
		ЮС	26,32	22,72	-13,70	14,44	-45,14	1,24	1,07	-13,40	0,67	-45,52
		ЗВ	22,06	21,34	-3,26	13,15	-40,39	1,04	1,01	-2,93	0,61	-40,80
		ВЗ	23,36	19,62	-16,02	14,79	-36,71	1,10	0,92	-15,73	0,69	-37,15

Тип	Перекресток	Направление	Среднее время ожидания, с					Средняя длина очереди, авт.				
			«Жесткое» управление	Система Ниттимаки	Изменение качества, %	Модиф. система	Изменение качества, %	«Жесткое» управление	Система Ниттимаки	Изменение качества, %	Модиф. система	Изменение качества, %
Ростов-на-Дону												
3	Текучёва Буденновский	СЮ	34,60	27,94	-19,26	27,10	-21,69	2,81	2,27	-19,41	2,20	-21,61
		ЮС	41,69	33,36	-19,99	28,58	-31,44	3,39	2,70	-20,15	2,32	-31,37
		ВЗ	32,61	29,74	-8,80	29,11	-10,71	2,65	2,41	-8,97	2,37	-10,62
2	Текучёва Соборный	ЮС	32,00	21,36	-33,26	13,44	-58,00	1,50	1,01	-33,03	0,63	-58,29
		ЗВ	25,01	19,89	-20,47	14,98	-40,11	1,17	0,94	-20,20	0,70	-40,53
		ВЗ	23,13	20,91	-9,61	11,79	-49,04	1,09	0,99	-9,30	0,55	-49,40
2	Текучёва Семашко	ЮС	27,85	21,07	-24,34	14,94	-46,33	1,31	0,99	-24,08	0,70	-46,71
		ЗВ	24,67	20,49	-16,93	13,20	-46,47	1,16	0,97	-16,65	0,62	-46,84
		ВЗ	26,90	19,47	-27,62	13,73	-48,98	1,26	0,92	-27,37	0,64	-49,33
2	Буденновский Варфоломеева	СЮ	25,67	21,24	-17,24	14,22	-44,59	1,21	1,00	-16,96	0,66	-44,97
		ЮС	25,61	20,24	-20,96	13,67	-46,60	1,20	0,95	-20,69	0,64	-46,97
		ЗВ	25,80	22,33	-13,43	14,05	-45,54	1,21	1,05	-13,14	0,66	-45,92
1	Варфоломеева Соборный	СЮ	15,78	9,09	-42,40	5,83	-63,03	1,16	0,67	-42,53	0,43	-63,08
		ЗВ	10,16	6,20	-38,91	4,19	-58,76	0,75	0,46	-39,05	0,31	-58,82
1	Варфоломеева Семашко	ЮС	5,79	6,84	18,19	5,62	-2,93	0,43	0,50	17,94	0,41	-3,07
		ЗВ	9,83	7,30	-25,70	4,57	-53,51	0,72	0,54	-25,86	0,34	-53,58
Среднее		тип 1	12,10	6,54	-45,95	5,31	-56,12	0,89	0,48	-46,07	0,39	-56,18
		тип 2	25,76	20,58	-20,11	13,72	-46,74	1,21	0,97	-19,83	0,64	-47,11
		тип 3	33,60	29,35	-12,65	27,91	-16,94	2,73	2,38	-12,82	2,27	-16,85

Приложение В

Результаты моделирования работы системы управления с использованием нейросетевого прогнозирования трафика

Перекресток	Направление	Среднее время ожидания, с			Средняя длина очереди, авт.		
		с полной инф.	с прогнозом		с полной инф.	с прогнозом	
Донецк							
Артема Панфилова	СЮ	13,08	13,04	-0,28%	0,61	0,61	-0,28%
	ЮС	14,40	14,50	0,72%	0,67	0,68	0,72%
	ЗВ	14,29	14,57	1,97%	0,67	0,68	1,97%
Артема Осв. Донбасса	СЮ	13,48	13,83	2,56%	0,63	0,64	2,56%
	ЮС	12,10	12,33	1,92%	0,56	0,58	1,92%
	ЗВ	13,79	13,98	1,33%	0,64	0,65	1,33%
Артема Титова	СЮ	11,87	12,14	2,27%	0,55	0,57	2,27%
	ЮС	13,71	13,84	0,92%	0,64	0,65	0,92%
	ЗВ	12,28	12,42	1,15%	0,57	0,58	1,15%
	ВЗ	14,59	14,74	1,09%	0,68	0,69	1,09%
Артема Мира	СЮ	13,67	13,93	1,88%	0,64	0,65	1,88%
	ЮС	13,76	13,99	1,68%	0,64	0,65	1,68%
	ЗВ	14,15	14,51	2,49%	0,66	0,68	2,49%
	ВЗ	14,18	14,49	2,16%	0,66	0,68	2,16%
Артема Ватутина	СЮ	13,41	13,79	2,85%	0,63	0,64	2,85%
	ЮС	13,99	14,32	2,35%	0,65	0,67	2,35%
	ЗВ	12,74	12,89	1,23%	0,59	0,60	1,23%
	ВЗ	16,17	16,88	4,41%	0,75	0,79	4,41%
Артема Б. Хмельницкого	СЮ	29,70	30,77	3,58%	2,42	2,50	3,58%
	ЮС	27,10	27,67	2,08%	2,20	2,25	2,08%
	ЗВ	29,56	30,13	1,90%	2,40	2,45	1,90%
	ВЗ	27,13	27,33	0,76%	2,21	2,22	0,76%
Университетская Панфилова	ЮС	13,60	13,87	1,96%	0,63	0,65	1,96%
	ЗВ	17,14	17,36	1,27%	0,80	0,81	1,27%
	ВЗ	14,51	14,59	0,57%	0,68	0,68	0,57%
Университетская Осв. Донбасса	ЮС	14,83	15,13	2,04%	0,69	0,71	2,04%
	ЗВ	12,19	12,39	1,66%	0,57	0,58	1,66%
	ВЗ	12,19	12,52	2,71%	0,57	0,58	2,71%
Университетская Титова	ЮС	15,25	15,46	1,34%	0,71	0,72	1,34%
	ЗВ	12,70	13,04	2,65%	0,59	0,61	2,65%
	ВЗ	12,91	13,30	3,00%	0,60	0,62	3,00%
Университетская Мира	ЮС	13,84	14,06	1,65%	0,65	0,66	1,65%
	ЗВ	13,67	13,93	1,89%	0,64	0,65	1,89%
	ВЗ	11,87	12,27	3,34%	0,55	0,57	3,34%
Университетская Ватутина	ЮС	14,14	14,31	1,19%	0,66	0,67	1,19%
	ЗВ	13,77	14,03	1,86%	0,64	0,65	1,86%
	ВЗ	13,26	13,37	0,77%	0,62	0,62	0,77%
Университетская Б. Хмельницкого	ЮС	27,89	28,95	3,82%	2,27	2,35	3,82%
	ЗВ	24,70	25,32	2,51%	2,01	2,06	2,51%
	ВЗ	28,22	28,38	0,57%	2,30	2,31	0,57%
Щорса Панфилова	СЮ	4,12	4,24	2,87%	0,30	0,31	2,87%
	ЗВ	6,12	6,30	3,00%	0,45	0,46	3,00%
	ВЗ	5,42	5,42	-0,15%	0,40	0,40	-0,15%

Перекресток	Направление	Среднее время ожидания, с			Средняя длина очереди, авт.		
		с полной инф.	с прогнозом		с полной инф.	с прогнозом	
Щорса Осв. Донбасса	СЮ	4,38	4,53	3,30%	0,32	0,33	3,30%
	ЗВ	4,84	4,98	2,85%	0,36	0,37	2,85%
	ВЗ	6,18	6,33	2,44%	0,45	0,46	2,44%
Щорса Мира	СЮ	5,85	5,94	1,64%	0,43	0,44	1,64%
	ЗВ	6,02	6,17	2,53%	0,44	0,45	2,53%
	ВЗ	5,61	5,73	2,22%	0,41	0,42	2,22%
Щорса Ватутина	СЮ	6,14	6,27	2,02%	0,45	0,46	2,02%
	ЗВ	5,52	5,62	1,77%	0,41	0,41	1,77%
	ВЗ	2,62	2,69	2,82%	0,19	0,20	2,82%
Щорса Б. Хмельницкого	СЮ	13,48	13,30	-1,29%	0,63	0,62	-1,29%
	ЗВ	14,19	14,19	-0,02%	0,66	0,66	-0,02%
	ВЗ	13,07	13,48	3,12%	0,61	0,63	3,12%
Р. Люксембург Панфилова	СЮ	4,64	4,77	2,80%	0,34	0,35	2,80%
	ЮС	5,96	6,12	2,64%	0,44	0,45	2,64%
	ЗВ	3,74	3,76	0,65%	0,27	0,28	0,65%
	ВЗ	6,84	6,97	1,90%	0,50	0,51	1,90%
Р. Люксембург Мира	СЮ	6,11	6,23	1,91%	0,45	0,46	1,91%
	ЮС	4,98	5,09	2,16%	0,37	0,37	2,16%
	ЗВ	4,98	5,06	1,52%	0,37	0,37	1,52%
	ВЗ	5,55	5,68	2,33%	0,41	0,42	2,33%
Р. Люксембург Ватутина	СЮ	5,58	5,66	1,51%	0,41	0,42	1,51%
	ЮС	5,01	5,15	2,84%	0,37	0,38	2,84%
	ЗВ	7,51	7,74	3,05%	0,55	0,57	3,05%
	ВЗ	4,76	4,94	3,90%	0,35	0,36	3,90%
Р. Люксембург Б. Хмельницкого	СЮ	13,60	13,82	1,64%	0,63	0,64	1,64%
	ЮС	14,44	14,66	1,48%	0,67	0,68	1,48%
	ЗВ	13,15	13,52	2,79%	0,61	0,63	2,79%
	ВЗ	14,79	14,83	0,30%	0,69	0,69	0,30%
Ростов-на-Дону							
Текучёва Буденновский	СЮ	27,10	27,82	2,68%	2,20	2,26	2,68%
	ЮС	28,58	29,08	1,73%	2,32	2,37	1,73%
	ВЗ	29,11	29,41	1,02%	2,37	2,39	1,02%
Текучёва Соборный	ЮС	13,44	13,75	2,30%	0,63	0,64	2,30%
	ЗВ	14,98	15,24	1,80%	0,70	0,71	1,80%
	ВЗ	11,79	11,84	0,47%	0,55	0,55	0,47%
Текучёва Семашко	ЮС	14,94	15,27	2,18%	0,70	0,71	2,18%
	ЗВ	13,20	13,45	1,89%	0,62	0,63	1,89%
	ВЗ	13,73	13,74	0,12%	0,64	0,64	0,12%
Буденновский Варфоломеева	СЮ	14,22	14,74	3,63%	0,66	0,69	3,63%
	ЮС	13,67	13,96	2,06%	0,64	0,65	2,06%
	ЗВ	14,05	14,33	2,03%	0,66	0,67	2,03%
Варфоломеева Соборный	СЮ	5,83	5,96	2,10%	0,43	0,44	2,10%
	ЗВ	4,19	4,27	2,07%	0,31	0,31	2,07%
Варфоломеева Семашко	ЮС	5,62	5,67	0,93%	0,41	0,42	0,93%
	ЗВ	4,57	4,64	1,67%	0,34	0,34	1,67%
Среднее		1,92%			1,92%		

Приложение Г

**Документы, подтверждающие эффективность
использования результатов работы****АДМИНИСТРАЦИЯ
ГОРОДСКОГО ОКРУГА ДОНЕЦК
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**

ул. Артема, 98, г.о. Донецк, г. Донецк, 283050, тел. +7 (856) 304-92-92, e-mail: gorokrug.donetsk@mail.ru

21.01.2025

№ МО-555/01-03-14исл

на № _____ от _____

Справка

**о практическом применении результатов диссертационного исследования
Стрижко М.А. на тему: «Модификация системы управления автотранспортными
потоками на регулируемых перекрестках на основе средств искусственного интеллекта»**

Повышение эффективности светофорного регулирования дорожного движения на перекрестках на основе современных средств автоматизации, интеллектуальных методов управления, технологий интернета вещей и «умного» города является актуальной задачей, имеющей большое значение для управления движением автотранспортных потоков в условиях постоянного увеличения их интенсивности, что характерно для городского округа Донецк.

В диссертационной работе Стрижко М.А. решена научная задача повышения эффективности управления движением потоков автотранспортных средств при проезде регулируемых перекрестков путем совершенствования системы автоматического регулирования на основе научного обоснования структуры и параметров, применяемых математических моделей описания трафика и модификации метода интеллектуального управления, основанных на принципах нечеткой логики и нейросетевого прогнозирования.

Результаты диссертационных исследований Стрижко М.А., в частности: математическое описание движения автотранспортных потоков на регулируемых перекрестках и рекомендации по реализации интеллектуального управления движением автотранспортных потоков на регулируемых перекрестках, могут иметь практическое использование для совершенствования системы управления на регулируемых перекрестках, что обеспечит безопасность дорожного движения на улично-дорожной сети городского округа Донецк.

Заместитель главы администрации
городского округа Донецк
Донецкой Народной Республики

В.А. Ляховец



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"
(ФГБОУ ВО "ДонНТУ")**

Артема ул., 58, г. Донецк, г.о. Донецкий, Донецкая Народная Республика, 283001 тел.: +7 (856) 337-17-33, 301-07-69
e-mail: donntu.info@mail.ru ОКПО 95580141 ОГРН 1229300078633 ИНН/КПП 9303013012/930301001

21.01.2025 № 30-12/2

На № _____

Диссертационный совет 24.2.491.03
при ФГБОУ ВО «Донецкий
национальный технический
университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Стрижко Михаила Александровича на тему: «Модификация системы управления автотранспортными потоками на регулируемых перекрестках на основе средств искусственного интеллекта», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки) в учебный процесс ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

Результаты диссертационных исследований Стрижко М. А., а именно: модификация системы управления автотранспортными потоками и рекомендации по практическому использованию предложенных решений внедрены в учебный процесс при проведении лабораторных работ по дисциплинам «Прикладное программирование в технических системах», «Прикладное программное обеспечение», «Компьютерные технологии управления в технических системах» для студентов направлений подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах», 27.04.04 «Управление в технических системах», что отражено в учебных программах вышеуказанных дисциплин.

Проректор
д-р техн. наук, профессор

А. Б. Бирюков

Начальник учебно-методического управления
канд. техн. наук, доцент

В. А. Попов

Заведующий кафедрой «Автоматика и телекоммуникации»
канд. техн. наук, профессор

В. В. Турупалов





**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"
(ФГБОУ ВО "ДонНТУ")**

Артема ул., 58, г. Донецк, г.о. Донецкий, Донецкая Народная Республика, 283001 тел.: +7 (856) 337-17-33, 301-07-69
e-mail: donntu.info@mail.ru ОКПО 95580141 ОГРН 1229300078633 ИНН/КПП 9303013012/930301001

21.01.2025 № 30-12/3

На № _____

Диссертационный совет 24.2.491.03
при ФГБОУ ВО «Донецкий
национальный технический
университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Стрижко Михаила Александровича на тему: «Модификация системы управления автотранспортными потоками на регулируемых перекрестках на основе средств искусственного интеллекта», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

Результаты диссертационных исследований Стрижко М. А., связанные с интеллектуальным управлением автотранспортными потоками на регулируемых перекрестках использованы в рамках научно-исследовательской темы кафедры автоматики и телекоммуникаций «Метод интеллектуального управления для регулирования транспортных потоков» (шифр темы Н 2024-2, сроки выполнения темы: 01.02.2024–31.01.2026) с целью снижения загруженности дорожно-транспортной сети путем усовершенствования системы управления светофорными объектами.

Проректор по научной работе
д-р техн. наук, профессор

С. В. Борщевский

Начальник НИЧ
д-р техн. наук, доцент

К. Н. Лабинский

Заведующий кафедрой
«Автоматика и телекоммуникации»
канд. техн. наук, профессор

В. В. Турупалов

