

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)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

Научный кандидат технических наук, доцент  
руководитель: **ЧЕРВИНСКИЙ Владимир Владимирович**  
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк), доцент кафедры «Автоматика и телекоммуникации»

Официальные доктор технических наук, доцент  
оппоненты: **ЭНГЛЕЗИ Ирина Павловна**  
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Донецкая академия транспорта» (г. Донецк), ректор

кандидат технических наук, доцент  
**ШЕХОВЦОВ Алексей Игоревич**  
ФГБОУ ВО «Донецкий институт железнодорожного транспорта» (г. Донецк), декан факультета «Управление на железнодорожном транспорте»

Ведущая Государственное бюджетное учреждение  
организация: «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш имени В. А. Антипова» (г. Донецк)

Защита состоится «22» мая 2025 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.491.03 при ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, I учебный корпус, аудитория 1.203.

Тел. факс: +7 856 301-07-69, e-mail: donntu.info@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ДонНТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, II учебный корпус, а также на сайте: <http://donntu.ru>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

И. о. учёного секретаря  
диссертационного совета 24.2.491.03  
доктор технических наук, профессор



А. О. Новиков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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-регулирующего.

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.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, проведен краткий обзор и анализ научной литературы по теме диссертации, сформулирована цель и задачи исследований, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

**В первом разделе «Анализ современных подходов к управлению автотранспортными потоками на регулируемых перекрестках»** проведен анализ существующих методов управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием, в частности методов интеллектуального управления на основе нейронных сетей и нечеткой логики. Анализ литературы показывает, что существующие системы интеллектуального управления оперируют приращением длительности разрешающей фазы регулирования. Однако, такие системы управления зачастую нечувствительны к микроколебаниям транспортного потока и обеспечивают недостаточно высокое качество управления.

Рассмотрены известные математические модели движения автотранспорта по улично-дорожной сети. Они учитывают интенсивности подъезда и разъезда транспортных средств на перекрестках в течение цикла регулирования, принимая их постоянными для данного периода, что в условиях выраженных колебаний интенсивности транспортного потока может негативно сказываться на точности моделирования.

Изучены технические средства, необходимые для систем управления транспортными потоками. Радиолокационные детекторы транспорта на сегодняшний день являются наиболее эффективными благодаря устойчивости к различным погодным условиям, достаточно большому радиусу действия и простоте установки. Современные технологии беспроводной передачи данных и «облачных» вычислений позволяют упростить реализацию распределенных систем управления и оптимизировать использование вычислительных ресурсов.

Выявленные недостатки существующих систем управления автотранспортными потоками, а также рассмотренные современные методы интеллектуального управления и технические средства, дающие возможность повышения качества управления, позволили сформулировать цель и задачи исследования.

**Во втором разделе «Модификация математического описания автотрафика с учетом параметров транспортных потоков со смежных перекрестков»** рассмотрены получившие широкое применение модели задержки транспортных средств на перекрестках: модель М. Дж. Бэкманна (1), относящаяся к классу «точных» и модель Ф. В. Вебстера (2) из класса «приближенных».



Модель Ф. В. Вебстера оказалась нечувствительной к зафиксированным в ходе экспериментов изменениям интенсивности движения и исключена из дальнейшего рассмотрения. Модель М. Дж. Бэкманна показала различные результаты. При равномерном транспортном потоке расхождение между модельными и экспериментальными данными не превышает 8 % (рисунок 2), однако в условиях неравномерного потока транспортных средств модельные данные не адекватны экспериментальным, и в некоторых случаях расхождение достигает 86 % (рисунок 3).

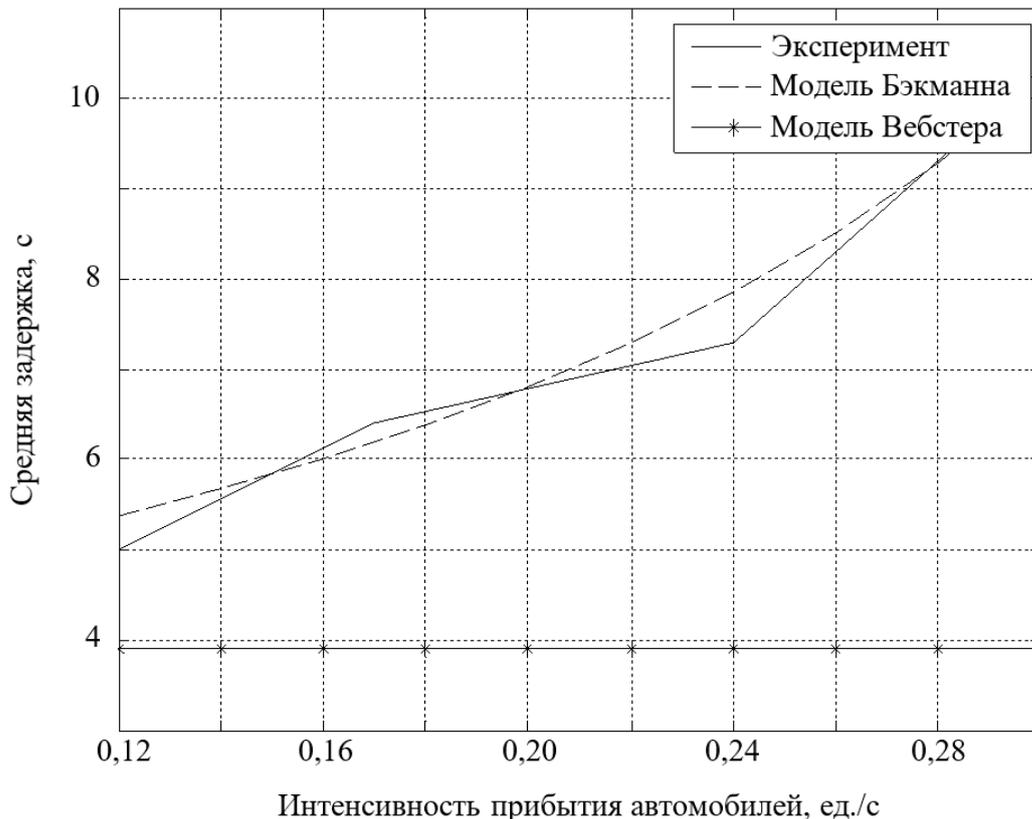


Рисунок 2 – Модельная и экспериментальная зависимости средней задержки от интенсивности прибытия автомобилей на перекрёсток при равномерном транспортном потоке

На основании экспериментальных данных в качестве критерия применимости модели М. Дж. Бэкманна предлагается использовать коэффициент неравномерности транспортного потока в течение цикла регулирования. При значениях данного коэффициента в диапазоне от 0,95 до 1,05 модель М. Дж. Бэкманна предлагается считать применимой.

Также установлено, что сдвиг разрешающей фазы регулирования на соседних перекрестках оказывает влияние на значение задержки транспортных средств на рассматриваемом перекрестке в течение цикла регулирования. В зависимости от значения сдвига фактическая задержка автотранспортных средств может быть как больше, так и меньше значений, полученных при помощи модели М. Дж. Бэкманна (рисунок 4).

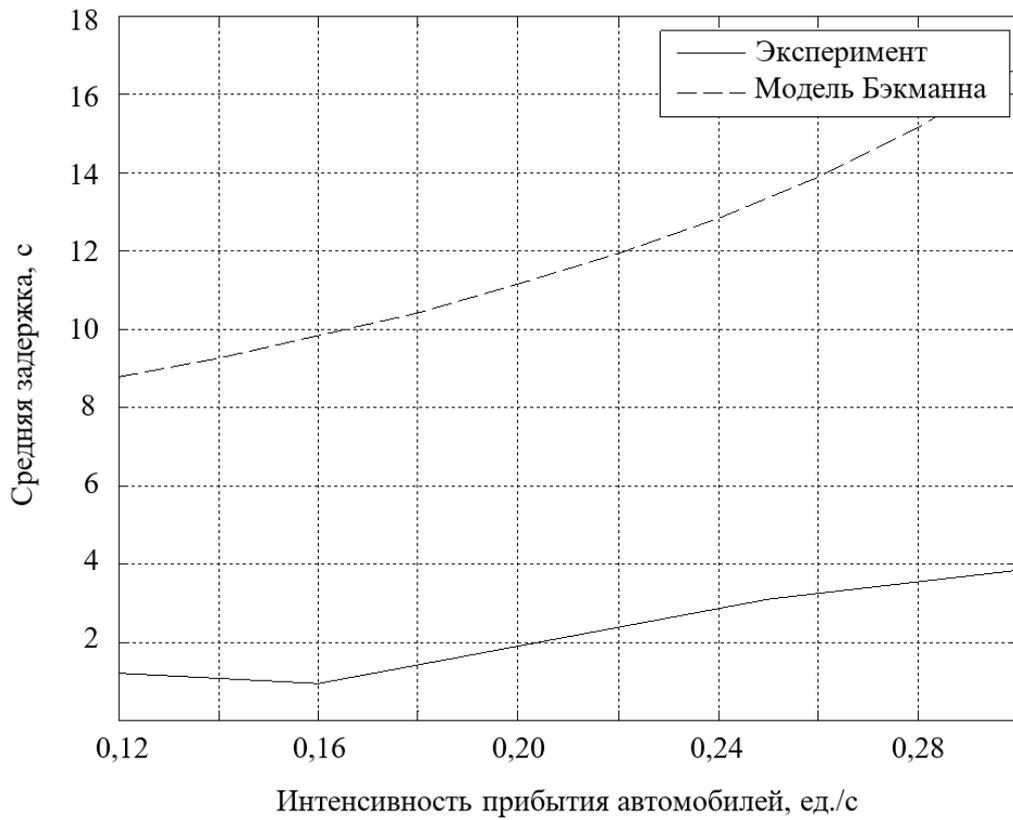


Рисунок 3 – Модельная и экспериментальная зависимости средней задержки от интенсивности прибытия автомобилей на перекрёсток с ярко выраженной неравномерностью транспортного потока

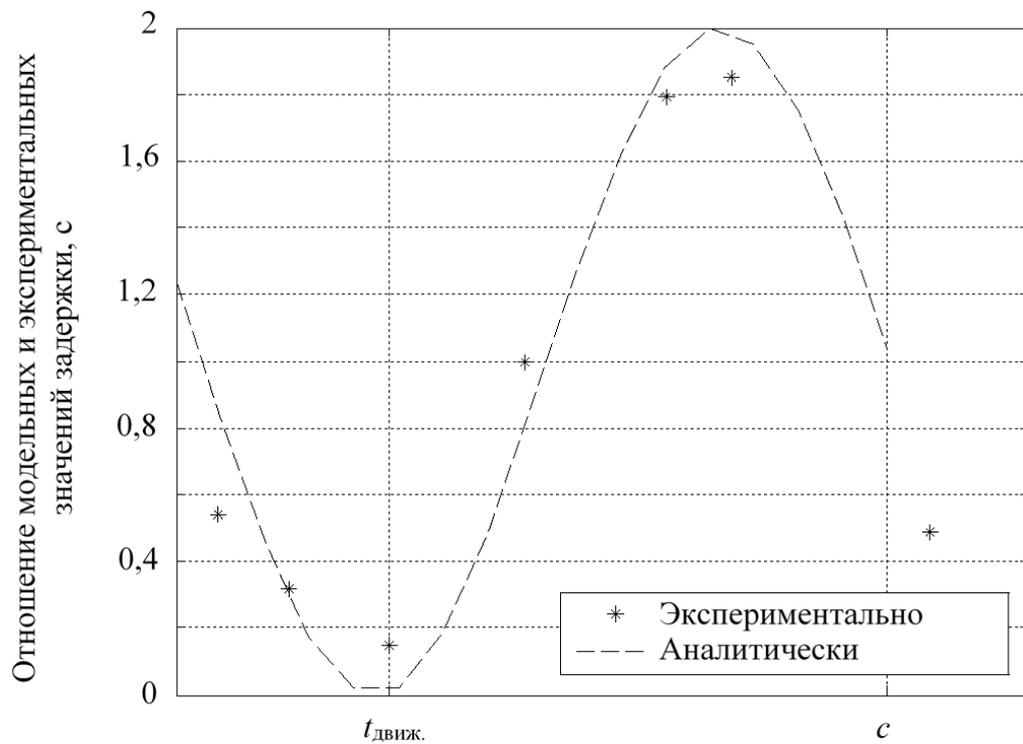


Рисунок 4 – Экспериментальная и аналитическая зависимости задержки автомобилей от сдвига разрешающей фазы регулирования на перекрёстке

Интенсивность движения транспортных средств, вливающих в рассматриваемый поток из конфликтующих направлений на вышестоящем перекрестке, делает его более равномерным, что также оказывает влияние на значение задержки. Предложенная в работе эмпирическая зависимость расхождения данных модели М. Дж. Бэкманна с экспериментальными данными описывается в (3).

$$\delta = - \left( 1 - \frac{q_{\text{кл}} + q_{\text{кп}}}{q} \right) \cdot \cos \left( \frac{2\pi\Delta t}{c} + \frac{S}{V} \right) + 1, \quad (3)$$

где  $q$  – общая интенсивность прибытия автомобилей на рассматриваемый перекресток, ед./с;  $q_{\text{кл}}$  и  $q_{\text{кп}}$  – интенсивности прибытия автомобилей, вливающих в транспортный поток на вышестоящем перекрестке слева и справа соответственно, ед./с;  $\Delta t$  – величина сдвига разрешающей фазы регулирования на рассматриваемом перекрестке, с;  $c$  – длительность цикла регулирования, с;  $S$  – расстояние до вышестоящего перекрестка, м;  $V$  – средняя скорость транспортного потока, м/с.

Полученное выражение предлагается использовать в виде дополнения исходной модели М. Дж. Бэкманна (4).

$$d = \left( - \left( 1 - \frac{q_{\text{кл}} + q_{\text{кп}}}{q} \right) \cdot \cos \left( \frac{2\pi\Delta t}{c} + \frac{S}{V} \right) + 1 \right) \cdot \frac{c - g}{c \left( 1 - \frac{g}{S} \right)} \left( \frac{q_0}{q} + \frac{c - g + 1}{2} \right) \quad (4)$$

Введение дополнительной составляющей в известную модель позволило достичь адекватности модельных данных экспериментальным для условий неравномерного транспортного потока. Расхождение между результатами моделирования и натурального эксперимента не превышает 5 %. (рисунок 5).

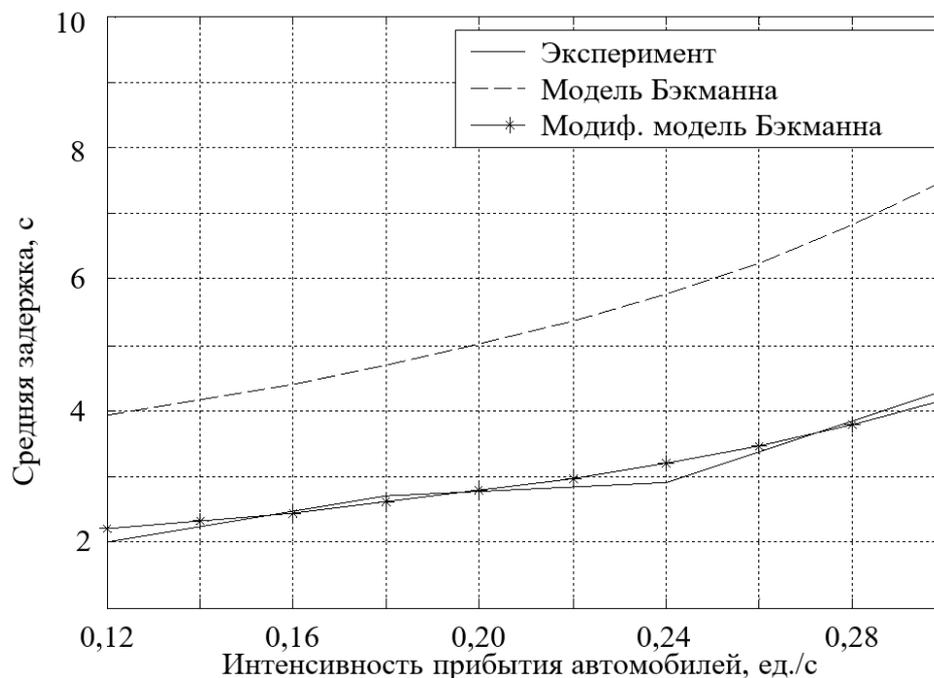


Рисунок 5 – Экспериментальная и модельные зависимости средней задержки от интенсивности прибытия транспортных средств на перекрестке, полученные при помощи исходной и модифицированной моделей М. Дж. Бэкманна

Разработанная модификация делает модель М. Дж. Бэкманна применимой в условиях перекрестков с высокой степенью взаимного влияния по автотранспортному потоку при неравномерной интенсивности прибытия транспортных средств.

В третьем разделе «Модификация интеллектуальной системы управления автотранспортными потоками на регулируемых перекрестках» рассматриваются задачи разработки структуры и определения параметров интеллектуальной системы управления автотранспортными потоками.

Структурная схема системы управления представлена на рисунке 6. На ней приняты следующие обозначения: УУ – управляющее устройство; ИУ – исполнительное устройство – комплекс светофоров на перекрестке; ОУ – объект управления – перекресток со светофорным регулированием; Д – детектор транспорта, необходимый для фиксации количества автомобилей на подъездах к перекрестку; Н – наблюдатель (модуль прогноза), необходимый для восстановления недостающих данных о состоянии объекта управления. Векторы, обозначенные на схеме, приведены в (5).

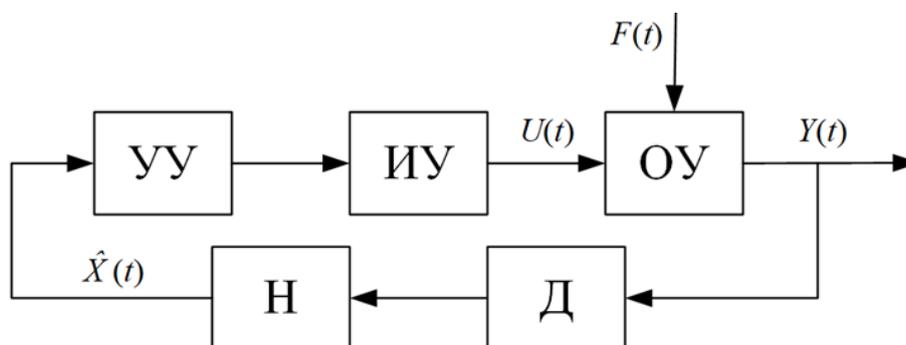


Рисунок 6 – Структурная схема системы интеллектуального управления транспортными потоками на перекрестке

$$Y(t) = \begin{bmatrix} n_{11}^1(t) \\ \dots \\ n_{ij}^k(t) \\ m_{11}^1(t) \\ \dots \\ m_{ij}^k(t) \end{bmatrix}; \hat{X}(t) = \begin{bmatrix} n_{11}^1(t) \\ \dots \\ \hat{n}_{ij}^k(t) \\ m_{11}^1(t) \\ \dots \\ m_{ij}^k(t) \end{bmatrix}; U(t) = \begin{bmatrix} \tau_k^1(t) \\ \tau_{\text{ж}}^1(t) \\ \tau_3^1(t) \\ \dots \\ \tau_k^i(t) \\ \tau_{\text{ж}}^i(t) \\ \tau_3^i(t) \end{bmatrix}; F(t) = \begin{bmatrix} q_1(t) \\ \dots \\ q_i(t) \\ l_1(t) \\ \dots \\ l_i(t) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

На вход системы поступает вектор переменных  $n_{ij}^k(t)$  и  $m_{ij}^k(t)$  с данными о количестве автомобилей, подъезжающих к рассматриваемому перекрестку и, соответственно, отъезжающих от вышестоящего перекрестка, в направлении  $k$  по полосе  $i$  на участке  $j$ . Управляющим воздействием в системе выступают сигналы переключения фаз регулирования  $\tau_i^i(t)$ . В качестве возмущающих воздействий приняты значения интенсивности транспортного потока за пределами зоны отслеживания трафика  $q_i(t)$ , а также режим регулирования соседних светофорных объектов  $l_i(t)$ . Соответствие описанных переменных схеме перекрестка как объекта управления представлено на рисунке 7.



Количество автомобилей на каждом участке классифицируется категориями: «Мало машин», «Средне машин», «Много машин» ( $GS$ ,  $GM$ ,  $GB$  в направлении разрешенного движения и, соответственно,  $RS$ ,  $RM$ ,  $RB$  в направлении скапливающейся очереди). Номера ближайших к перекрестку участков с каждой категорией загруженности являются входными нечеткими переменными системы.

Выходная нечеткая переменная системы – уровень целесообразности переключения сигнала в текущий момент времени. Использование данной величины для формирования управляющего вектора сигналов светофоров позволяет приблизить процесс управления к логике действий регулятора, повышая чувствительность системы к микроколебаниям транспортного потока по сравнению методами управления, основанными на оценке приращения длительности фаз регулирования. Взаимосвязь входов и выходов системы нечеткого управления представлена на рисунке 9.

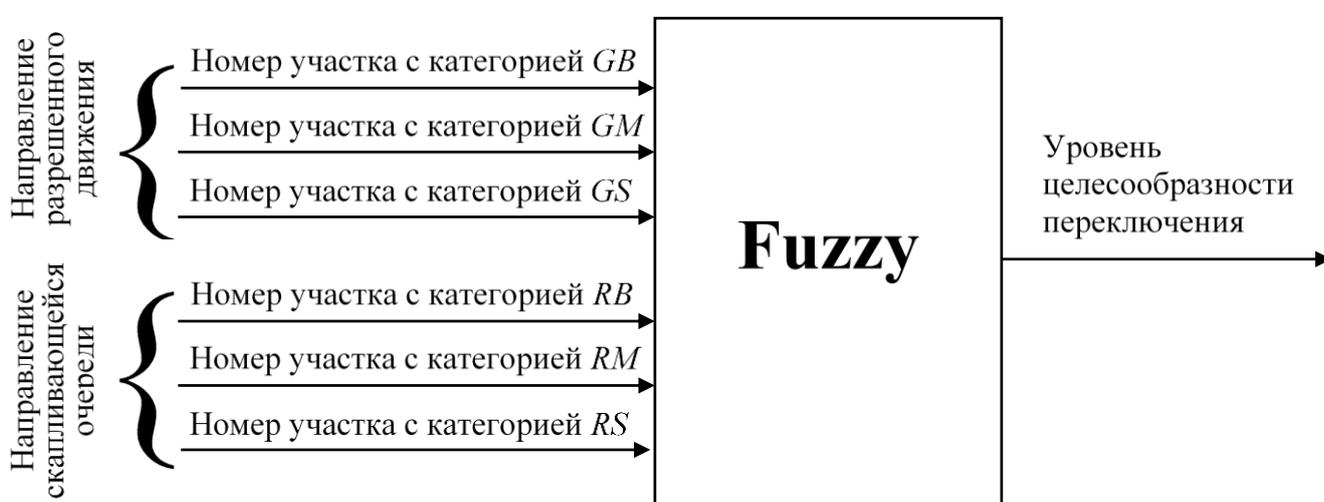


Рисунок 9 – Взаимосвязь входов и выходов системы нечеткого управления

Каждая входная переменная описывается термами, фазифицирующими номер участка с данной категорией загруженности относительно перекрёстка: «Близко» ( $C$ ), «Средне» ( $M$ ) и «Далеко» ( $F$ ). Функции принадлежности входных переменных для категорий  $GS$ ,  $RS$ ,  $GM$ ,  $RM$  представлены на рисунке 10.

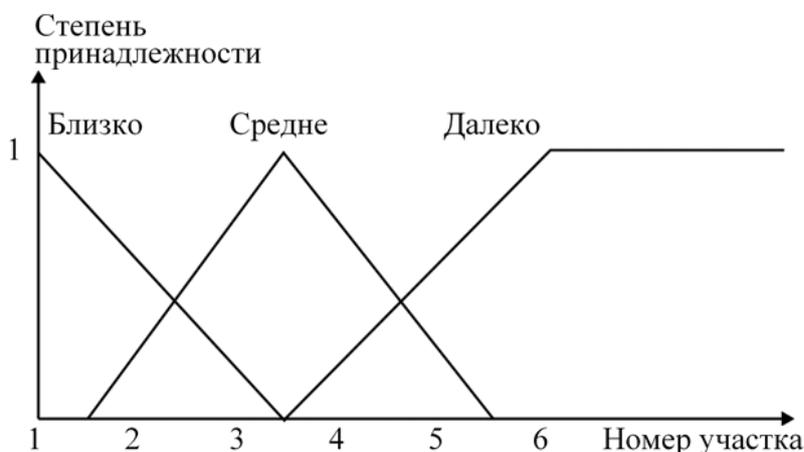


Рисунок 10 – Функции принадлежности входных переменных для категорий загруженности  $GS$ ,  $RS$ ,  $GM$ ,  $RM$

Функции принадлежности входных переменных для категорий загруженности  $GB$ ,  $RB$  имеют трапециевидную форму для термина «Близко», так как большее число подъезжающих к перекрестку автомобилей требует более быстрой реакции управления (рисунок 11).

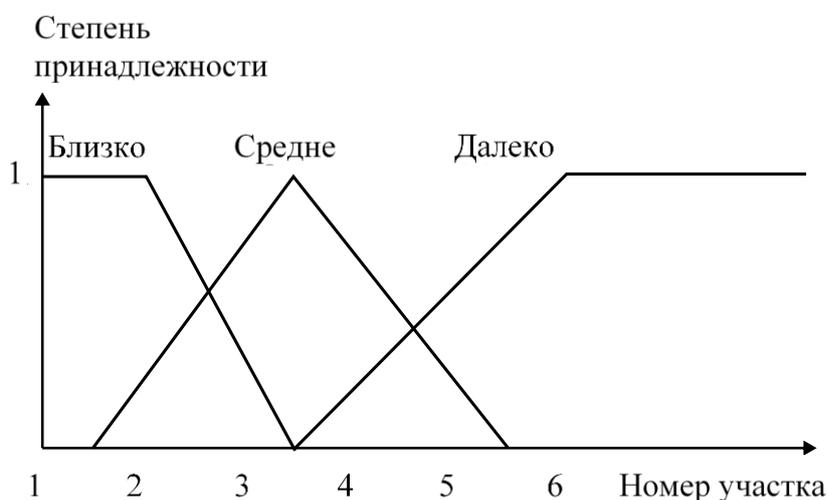


Рисунок 11 – Функции принадлежности входных переменных для категорий загруженности  $GB$ ,  $RB$

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 12).

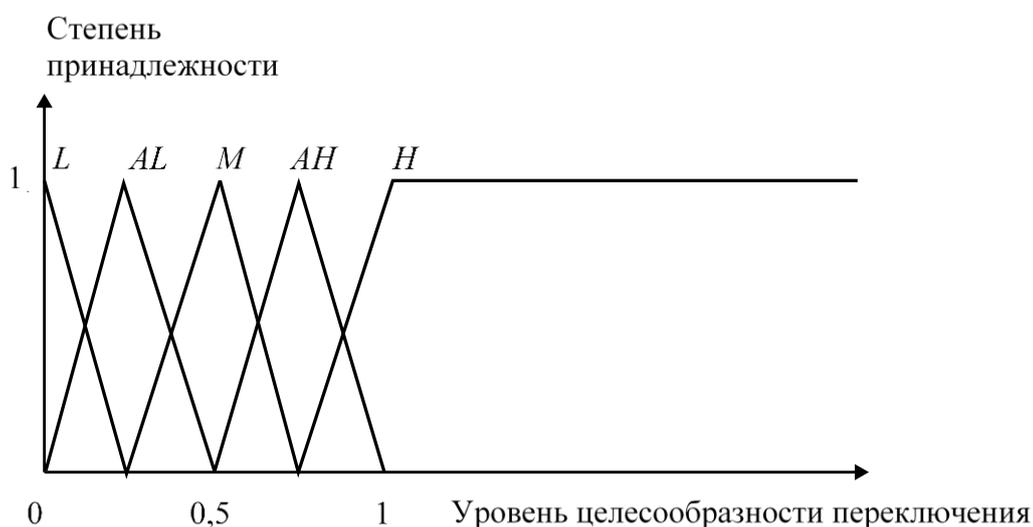


Рисунок 12 – Функции принадлежности выходной переменной

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

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. Сравнение осуществлено по двум показателям: среднее время ожидания и средняя длина очереди. Для проверки универсальности предложенной системы её модельное тестирование проведено для ряда перекрестков городов Донецк и Ростов-на-Дону.

С целью выявления особенностей работы системы в различных условиях движения моделируемые перекрестки классифицированы по интенсивности и неравномерности транспортного потока. Выделены характерные их типы:

- 1) с интенсивностью 0,10...0,20 авт./с и неравномерностью 1,3...1,5;
- 2) с интенсивностью 0,15...0,25 авт./с и неравномерностью 1,1...1,3;
- 3) с интенсивностью 0,20...0,30 авт./с и неравномерностью 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. Ниитимаки. Для перекрестков второго типа модифицированная система управления показала повышение эффективности управления на 46 % по данным показателям по сравнению с «жестким» управлением и 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 показатели для всех исследуемых перекрестков, модифицированная система управления по сравнению с «жестким» управлением демонстрирует среднее повышение эффективности управления на 39 % и по сравнению с системой управления Я. Ниитимаки – на 13 %. Сравнительные гистограммы качества управления по различным системам приведены на рисунках 13, 14.

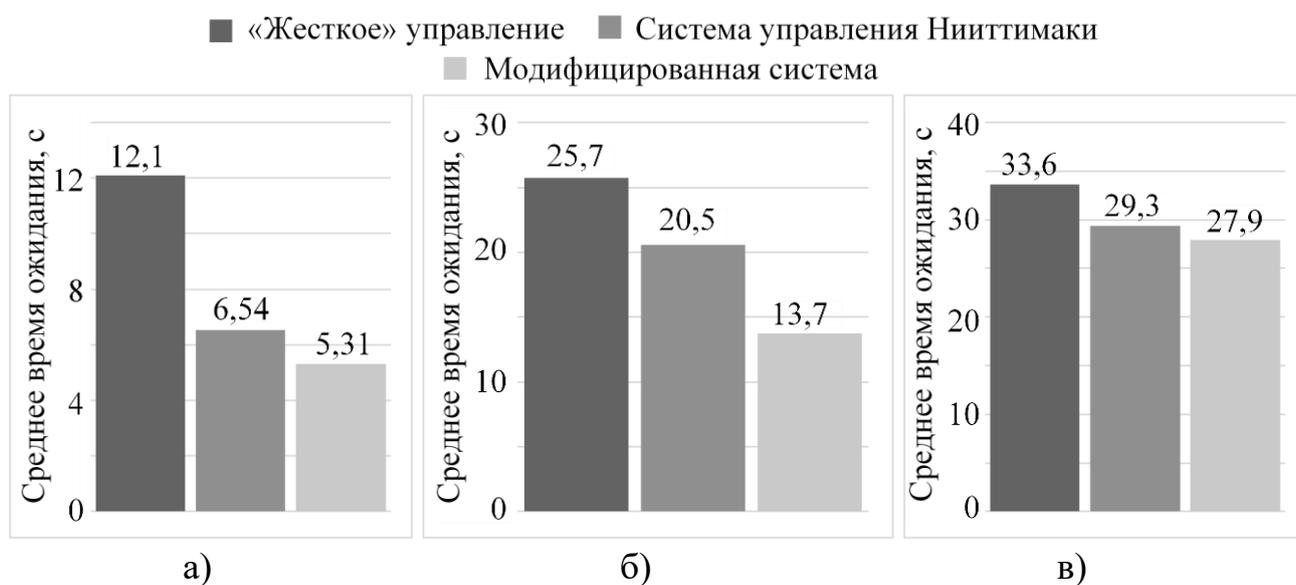


Рисунок 13 – Среднее время ожидания на перекрестке: а) тип 1; б) тип 2; в) тип 3.

■ «Жесткое» управление   ■ Система управления Нииттимаки  
 ■ Модифицированная система

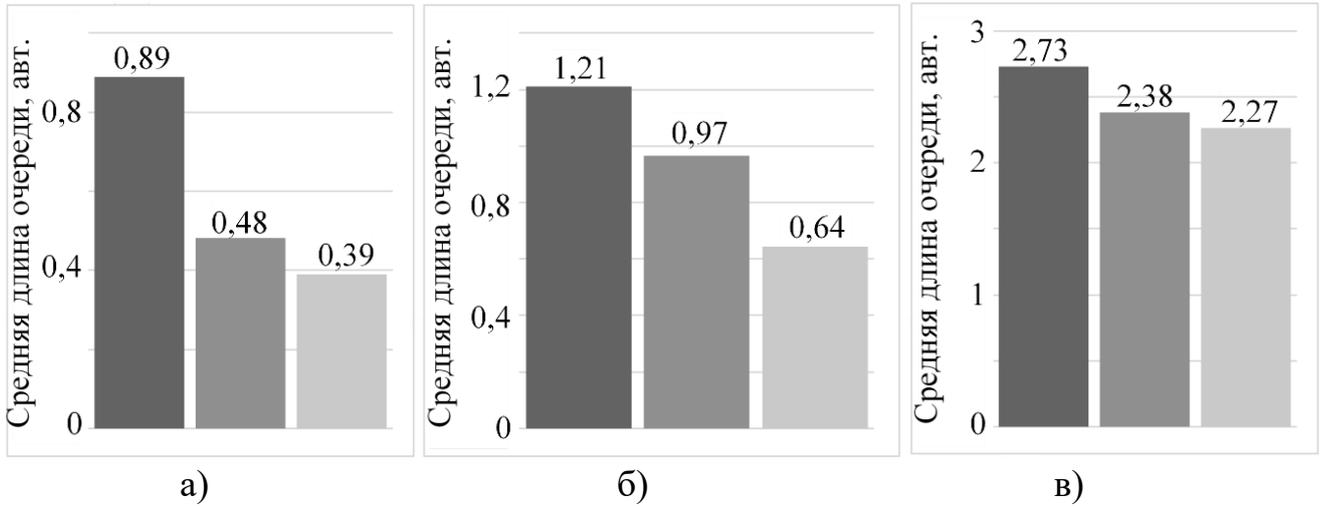


Рисунок 14 – Средняя длина очереди на перекрестке: а) тип 1; б) тип 2; в) тип 3.

На рисунке 15 приведены временные диаграммы работы систем с «жестким» и интеллектуальным управлением.

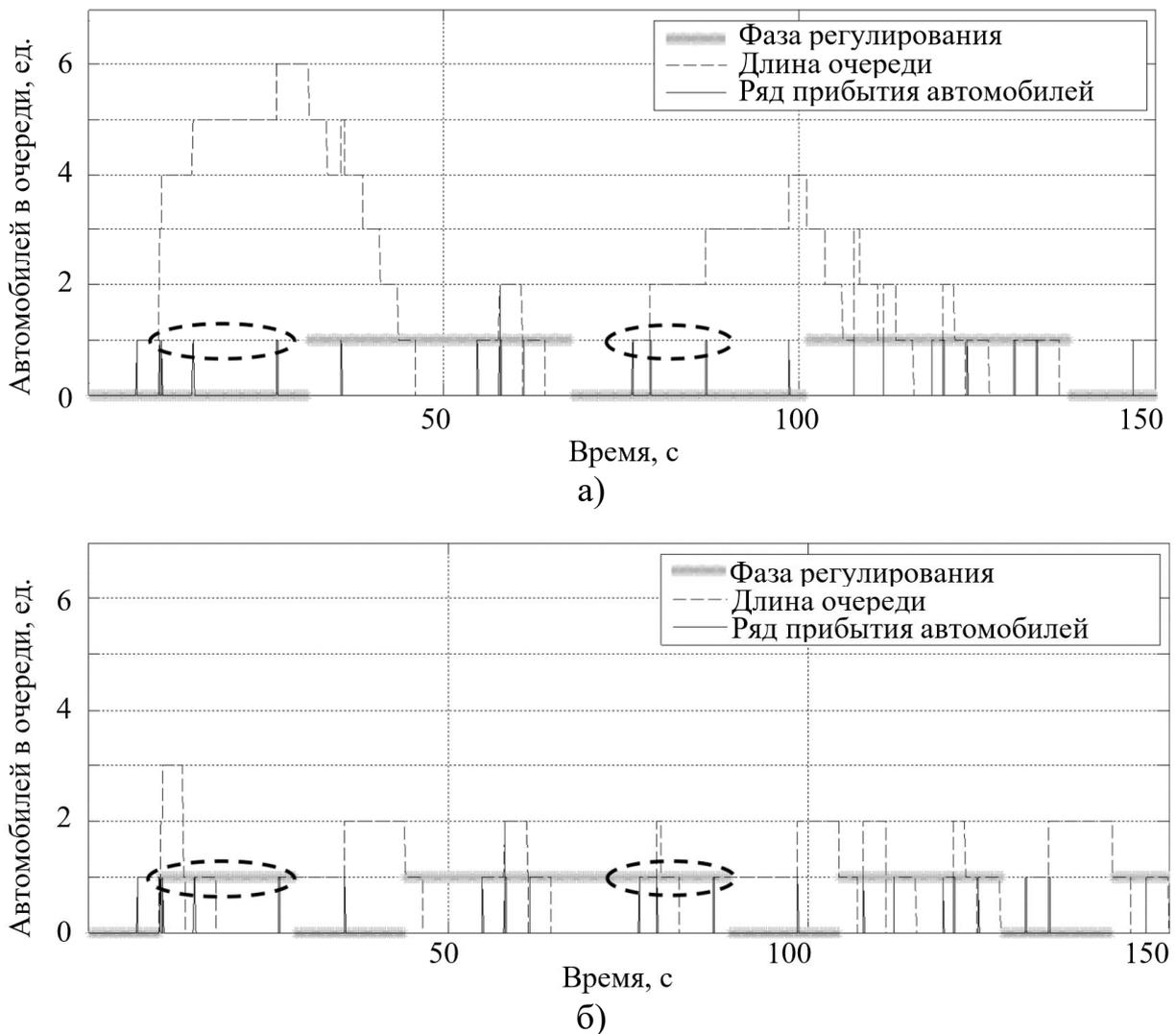


Рисунок 15 – Временные диаграммы функционирования систем: а) с «жестким» управлением; б) с интеллектуальным управлением

На рисунке 15 жирной сплошной линией обозначена фаза регулирования в рассматриваемом направлении. Значение «1» соответствует разрешающей фазе, а значение «0» – запрещающей. Тонкой сплошной линией обозначен временной ряд прибытия автомобилей на перекресток, тонкой пунктирной линией – количество автомобилей в очереди. Жирной пунктирной линией выделены моменты прибытия автомобилей на перекресток во время запрещающей фазы при «жестком» регулировании (рисунок 15, а). Действие запрещающей фазы в это время привело к увеличению очереди. В то же время при использовании интеллектуальной системы управления разрешающая фаза продлевается таким образом, чтобы те же автомобили проехали на зеленый сигнал светофора (рисунок 15, б). Это позволило уменьшить длину очереди при помощи «гибкого» управления.

Радиус действия большинства детекторов транспорта в условиях города составляет 40–100 м, в то время как расстояние между светофорными объектами – от 200 до 500 м. Следовательно, детекторы транспорта, установленные на соседних перекрестках, не всегда предоставляют полную информацию о загруженности участков дороги между перекрестками. Восполнение недостающих данных об автотранспортном потоке предлагается осуществлять путем прогнозирования с использованием регрессионной нейросети прямого распространения. Структура нейросети включает входной, скрытый и выходной слои. В качестве функции активации на скрытом слое используется «гиперболический тангенс», на выходном слое – линейная функция. Модель описывается выражением (6).

$$y(t) = f(x_{11}(t-1), \dots, x_{11}(t-d), \dots, x_{1i}(t-1), \dots, x_{1i}(t-d), \\ x_{21}(t-1), \dots, x_{21}(t-d), \dots, x_{2i}(t-1), \dots, x_{2i}(t-d)), \quad (6)$$

где  $y(t)$  – прогнозируемое количество автомобилей на одной полосе движения на рассматриваемом участке (выходная переменная);  $x_{1i}(t)$  – количество автомобилей на вышестоящем соседнем участке с известными данными о трафике по  $i$ -ой полосе движения (входная переменная);  $x_{2i}(t)$  – количество автомобилей на нижестоящем участке с известными данными о трафике по  $i$ -ой полосе движения (входная переменная);  $t$  – текущий момент времени, с;  $d$  – количество периодов дискретности временного ряда. Период дискретности временных рядов, содержащих данные о количестве автомобилей на рассматриваемых участках, принимается равным 1 с. Взаимосвязь входов и выходов нейронной сети представлена на рисунке 16.

Так как нейросетевое прогнозирование трафика требует индивидуального обучения нейросети на каждом участке в отдельности, что приводит к необходимости больших объемов вычислительных ресурсов и обучающих данных, предлагается выделить 9 наиболее распространенных типов участков дорожной сети и использовать на участке каждого типа нейросети, обученные на соответствующей выборке. Типизация участков осуществляется на основании ограничения максимальной скорости (60, 50, 40 км/ч) и количества полос движения в одном направлении (1, 2, 3 полосы).

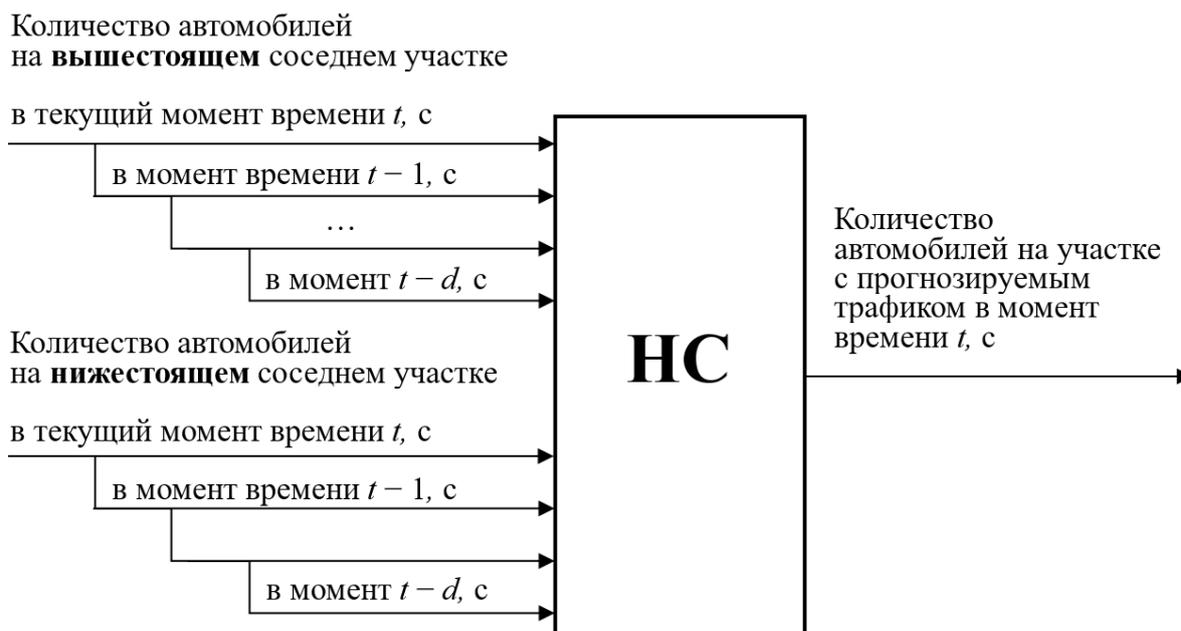


Рисунок 16 – Взаимосвязь входов и выходов нейронной сети для прогнозирования трафика

Размер вектора задержек (количество прошлых значений входных переменных, учитываемое при прогнозе выходной переменной) определяется таким образом, чтобы обеспечить достаточную точность прогнозирования при снижении скорости транспортного потока. Например, при движении автомобилей со скоростью 20 км/ч участок длиной порядка 40 м преодолевается за 7 с. Минимальный размер вектора задержек в этом случае составляет 7 тактов.

В зависимости от количества полос движения в одном направлении нейросети обладают различным количеством входов и нейронов на скрытом слое. Данные характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики нейросети для прогнозирования трафика на участках различных типов

Полос на участке	Входов нейросети	Нейронов на скрытом слое
1	14	14
2	28	28
3	42	42

Обучение нейронной сети производится по алгоритму обратного распространения ошибки. Для корректировки весов используется алгоритм Левенберга-Марквардта. В качестве обучающей выборки используются временные ряды с данными о количестве автомобилей на каждом из соседних участков при равномерно 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.

Проведено моделирование и сравнение качества работы модифицированной системы управления, имеющей полную информацию об автотранспортном потоке (однако труднореализуемой на практике) и системы управления, получающей

информацию на основе нейросетевого прогноза. По результатам моделирования 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 (рисунок 17).

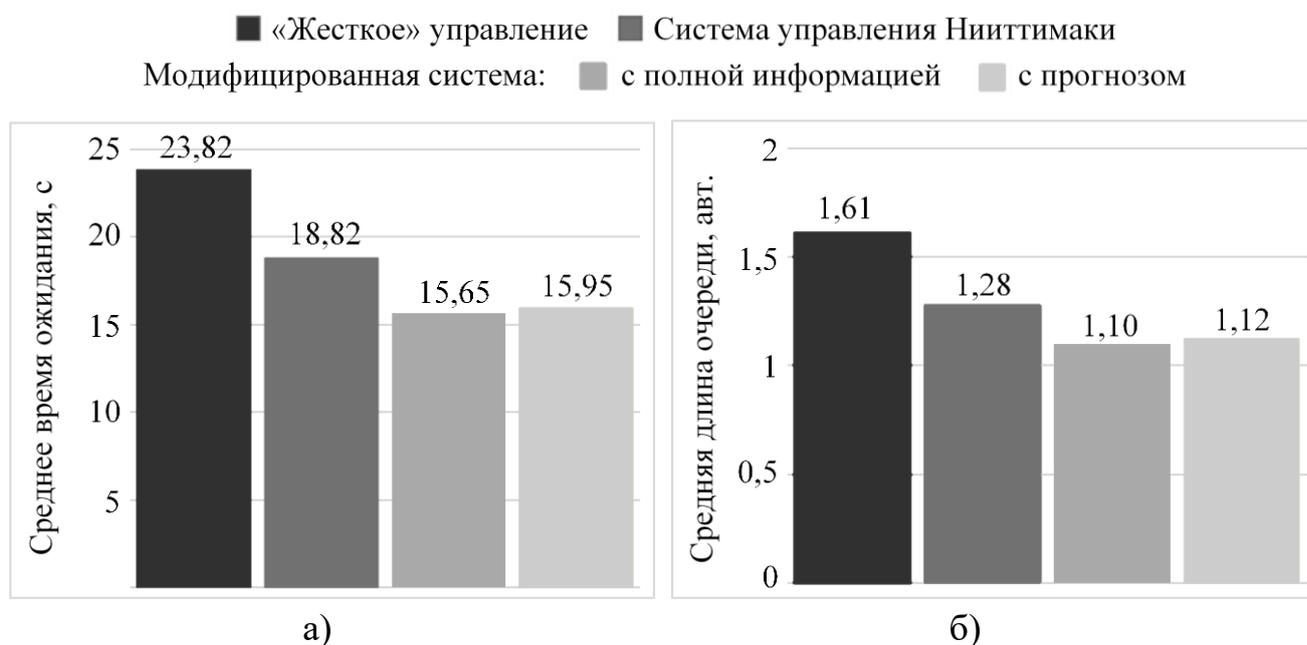


Рисунок 17 – Показатели качества идеализированной системы управления и системы с нейросетевым прогнозированием параметров трафика:  
 а) среднее время ожидания; б) средняя длина очереди

Разработаны рекомендации по практическому использованию предложенных решений в виде трёх вариантов 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 предполагает полностью «облачное» управление с размещением на объектах модулей ввода-вывода и использованием сети передачи данных пятого поколения (рисунок 18). Второй – допускает установку устройств управления на каждом объекте и использование «облака» только для реализации функций диспетчеризации (рисунок 19). Третий вариант совмещает в себе локальное управление на каждом перекрестке в отдельности и систему прогнозирования транспортных потоков, реализованную в облаке (рисунок 20).

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

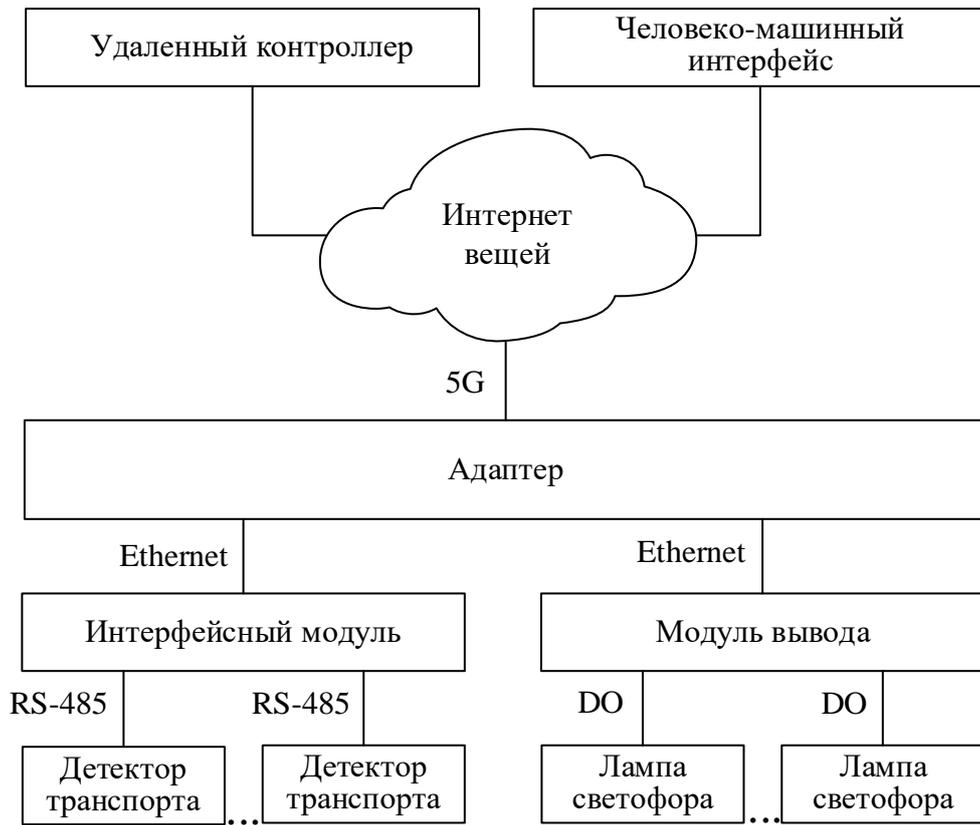


Рисунок 18 – Структурная схема комплекса технических средств системы управления транспортными потоками при «облачной» реализации

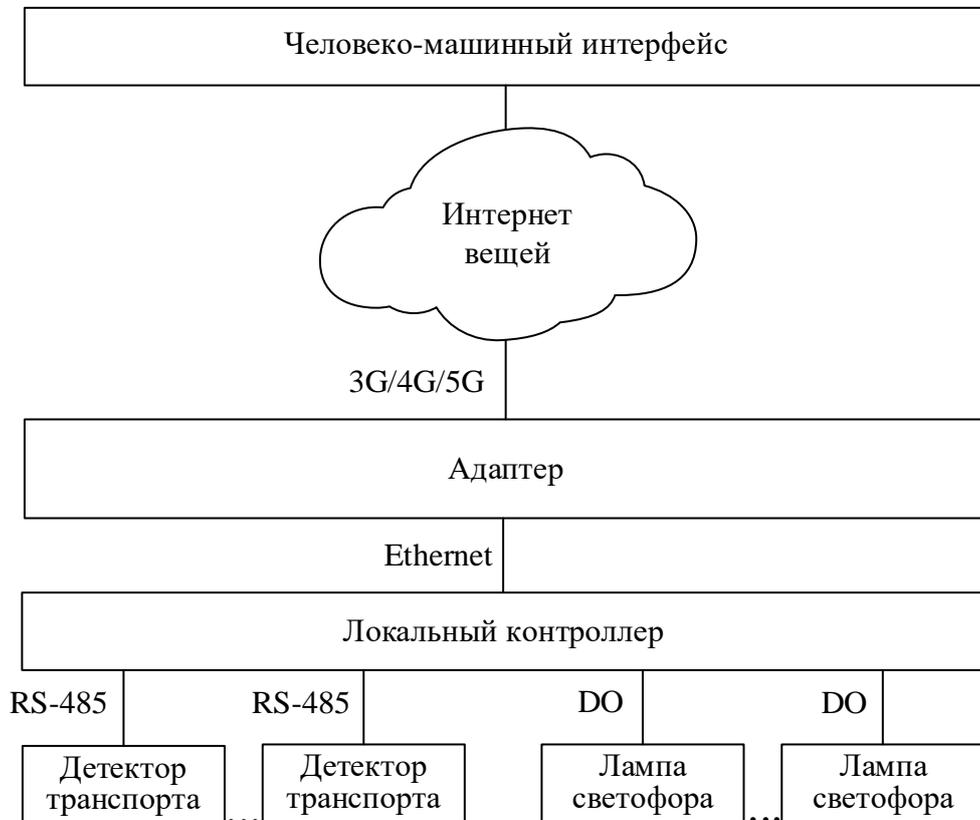


Рисунок 19 – Структурная схема комплекса технических средств системы управления транспортными потоками при локальной реализации

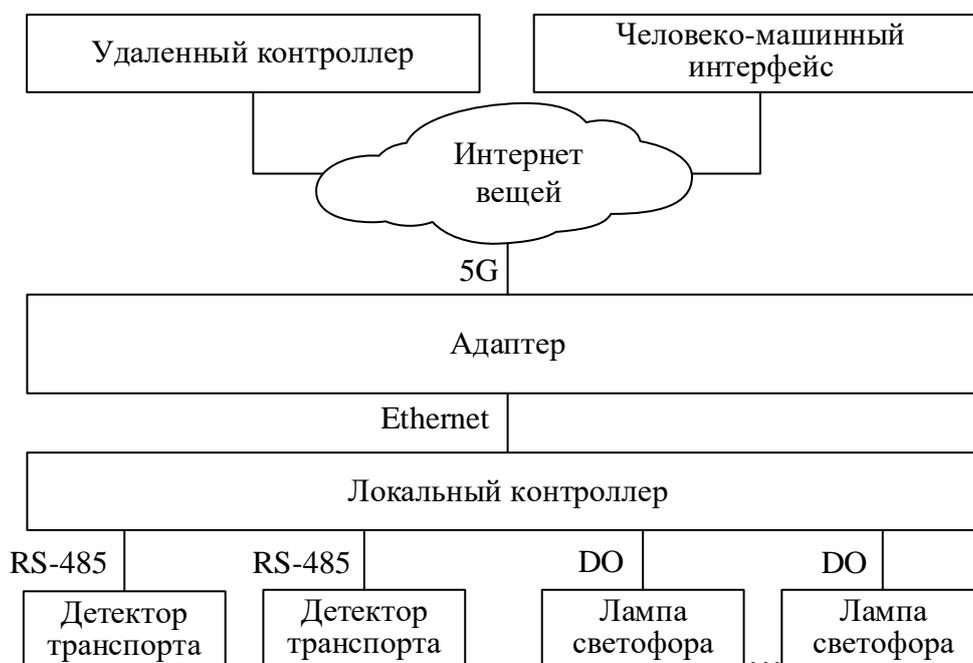


Рисунок 20 – Структурная схема комплекса технических средств системы управления транспортными потоками при смешанной реализации

## 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 перекрестках, 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-регулирущика, 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, проведенных 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 работ, опубликованных автором по теме диссертации.

***Научные работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях:***

1. **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.

2. **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.

3. **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.

4. **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.

5. **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.

***Научные работы и тезисы докладов в материалах научных конференций:***

6. **Стрижко, М. А.** Исследование распространенных моделей транспортных потоков для условий взаимосвязанных перекрёстков / **М. А. Стрижко, В. В. Червинский** // Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта: материалы IX международной научно-практической конференции в рамках IX Международного Научного форума Донецкой Народной Республики «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие», 24-25 мая 2023 г. – Часть 1. – Донецк : ДонИЖТ, 2023. – С. 164–169.

7. **Стрижко, М. А.** Исследование суточной неравномерности транспортного потока в городе Донецке / **М. А. Стрижко, В. В. Червинский** // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса 2023 : материалы IX Международной научно-практической конференции «Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса» в рамках 9-го Международного научного форума Донецкой Народной Республики «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие», 25 мая 2023 г. / редкол. : Д. Н. Самисько и др. – Горловка : АДИ (филиал) «ДонНТУ», 2023. – С. 303–306.

8. **Стрижко, М. А.** Моделирование систем fuzzy-управления транспортными потоками / **М. А. Стрижко, В. В. Червинский** // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых : сборник научных трудов XXII международной научно-технической конференции аспирантов и студентов в г. Донецке 24-26 мая 2022 г. – Донецк : ДонНТУ, 2022. – С 69–71.